TESIS - TM142501

STUDI NUMERIK *MULTIPLE-CHANNEL DIFFUSERS* PADA BODI BELAKANG BUS

SABDONO ABDI SUCIPTO

2114202005

DOSEN PEMBIMBING

Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

PROGRAM MAGISTER

BIDANG KEAHLIAN REKAYASA KONVERSI ENERGI

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK INDUSTRI

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2016

Halaman ini sengaja dikosongkan

THESIS - TM142501

NUMERICAL STUDY OF MULTIPLE-CHANNEL DIFFUSERS ON THE REAR BUS BODY

SABDONO ABDI SUCIPTO
2114202005

SUPERVISOR
Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

MASTER PROGRAM
FIELD STUDY OF ENERGY CONVERSION ENGINEERING
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016

Halaman ini sengaja dikosongkan

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
Sabdono Abdi Sucipto
Nrp. 2114202005

Tanggal Ujian: 18 Juli 2016
Periode Wisuda: September 2016

Disetujui oleh:

1. Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT. (Pembimbing)
   NIP. 197104051997021001

2. Prof. Ir. Sutardi, M. Eng., Ph.D. (Penguji)
   NIP. 196412281990031002

3. Dedy Zulhidayat Noor, S.T., M.T., Ph.D. (Penguji)
   NIP. 197512062005011002

KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI, DAN PENDIDIKAN TINGGI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
PROGRAM PASCASARJANA

Direktur Program Pascasarjana,

Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc., Ph.D
NIP. 196012021987011001

STUDI NUMERIK *MULTIPLE-CHANNEL DIFFUSER* PADA BODI BELAKANG BUS

Nama : **Sabdono Abdi Sucipto**
NRP : **2114202005**
Jurusan : **Teknik Mesin, FTI-ITS**
Dosen Pembimbing : **Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.**

ABSTRAK

Mobilitas masyarakat semakin meningkat pada era modern ini. Sehingga kebutuhan pada alat transportasi dan bahan bakar minyak pun meningkat. Keadaan demikian memunculkan tantangan dalam hal penghematan bahan bakar, jarak tempuh yang lebih jauh dan performa kendaraan yang lebih baik. *Drag* dan *lift* merupakan hal penting dalam bidang aerodinamika. Banyak studi telah dilakukan untuk optimalisasi *drag* dan *lift* suatu kendaraan. Salah satunya adalah penggunaan *diffuser* pada bodi belakang kendaraan. Modifikasi *diffuser* pun telah dilakukan berupa *multiple-channel diffuser.* Namun pada umumnya terdapat beberapa kondisi dimana penurunan *drag* oleh *multiple-channel diffuser* dapat menurunkan *downforce.* Oleh karena itu perlu analisa untuk mengoptimalkan pengaruh yang disebabkan *multiple-channel diffuser.*

3D-*Simplified bus model* (tanpa ban) diteliti pada bilangan Reynolds 2.19×10^6 (berdasarkan panjang model dan *velocity inlet*). Sudut *diffuser* (β) 12^o dipilih berdasarkan penelitian Wawan dan Nuril [1]. Sedangkan jumlah *channel* 3 dan 4 dipilih sebagai variasi penelitian. Penelitian tentang *multiple-channel diffuser* ini menggunakan *commercial CFD software.* 3D-*steady* RANS *equations* diselesaikan dengan kombinasi model turbulensi realizable k-epsilon. *Near wall treatment* berupa *standart wall functions* dan SIMPLE *algorithm* digunakan untuk *pressure-velocity coupling.*

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *multiple-channel diffusers* dapat meningkatkan aerodinamika kendaraan. *Multiple-channel diffusers* dapat meningkatkan kecepatan pada bagian bawah serta memperbaiki struktur aliran pada bagian belakang model bus. Selain itu, Koefisien drag terendah didapatkan pada jumlah *channel* 4, dengan penurunan sekitar 0,51% dibandingkan dengan tanpa *channel.* Sedangkan koefisien lift terendah didapatkan pada jumlah *channel* 2, dengan penurunan sekitar 5,44% dibandingkan dengan tanpa *channel.*

Kata kunci: Bodi belakang bus, *Multiple-channel diffusers,* koefisien *drag*, koefisien *lift*.

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

NUMERICAL STUDY OF *MULTIPLE-CHANNEL DIFFUSERS* ON THE REAR BUS BODY

Name : **Sabdono Abdi Sucipto**

NRP : **2114202005**

Department : **Mechanical Engineering, FTI-ITS**

Advisor : **Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.**

ABSTRACT

Human mobility has increased recently. Transportation and fuel consumption increased as well. This condition meet a challenge in term of saving fuel, further driving distance, and better driving performance. Drag and lift paly a big role in aerodynamic. Studies have been performed in optimizing drag and lift of vehicle. For example, using diffuser on the rear bus body. A modification on diffuser has been performed such as multiple-channel diffuser. However, in some condition decreasing drag using multiple-channel diffuser can decrease downforce as well. Therefore, further analysis is needed in order to get the optimum effect of multiple channel diffuser.

3D-Simplified bus model (without tire) is inspected at Reynolds number 2.19×10^6 (based on the length of bus and velocity inlet). Diffuser angle (β) 12^o is chosen based on Wawan and Nuril research [1]. Channel 3 and 4 is chosen as variable. This research use commercial CFD software. 3D-steady RANS equations were solved in combination with realizable k-epsilon turbulence model. Near wall treatment is standart wall functions and SIMPLE algorithm used for pressure-velocity coupling.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *multiple-channel diffusers* dapat meningkatkan aerodinamika kendaraan. *Multiple-channel diffusers* dapat meningkatkan kecepatan pada bagian bawah serta memperbaiki struktur aliran pada bagian belakang model bus. Selain itu, Koefisien drag terendah didapatkan pada jumlah *channel* 4, dengan penurunan sekitar 0,51% dibandingkan dengan tanpa *channel.* Sedangkan koefisien lift terendah didapatkan pada jumlah *channel* 2, dengan penurunan sekitar 5,44% dibandingkan dengan tanpa *channel.*

The result shows that multiple-channel diffusers can increase aerodynamics vehicle. Multiple-channel diffusers increase the velocity under the body and fix the flow structure on the rear bus body. The lowest drag coefficient reached at number of channel is 4, with about 0,51% reduction. While, number of channel 2 gives the optimum lift coefficient reduction, about 5,44% compared to no channel.

Keywords: Rear bus body. Multiple-channel diffusers, drag coefficient, lift coefficient.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur penulis curahkan sepenuhnya kepada Allah SWT, karena atas rahmat dan karunia-Nya tesis ini dapat terselesaikan. Penulis sangat menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tesis ini tidak lepas dari dukungan serta bantuan dari berbagai pihak. Melalui kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terimakasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dan mendukung baik secara moril maupun materil dalam proses penyelesaian tesis ini, antara lain:

1. Ibu Sukamti dan Bapak Suhermanto, selaku orangtua atas cinta, kasih sayang serta doa yang terus mengalir.
2. Kakak, adik beserta segenap keluarga tercinta yang telah mendukung dalam penyelesaian tesis ini.
3. Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT, selaku dosen pembimbing tesis yang telah memberikan saran, motivasi serta ilmu-ilmu yang bermanfaat bagi penulis.
4. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng Ph.D dan Dedy Zulhidayat Noor, ST. MT., Ph. D selaku dosen penguji.
5. Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng selaku Ketua Prodi Pascasarjana Teknik Mesin ITS Surabaya.
6. Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, ST, selaku Sekretaris Prodi Pascasarjana Teknik Mesin ITS Surabaya.
7. Ir. Bambang Pramujati, M.Sc.,Ph.D, selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin ITS Surabaya.
8. Segenap karyawan Jurusan Teknik Mesin ITS Surabaya.
9. *Palapa kids,* sahabat sejak masa putih abu-abu atas segala cerita, memori serta dukungan yang begitu unik.
10. Kawan-kawan Teknik Mesin UNS Solo, terutama TM’09 atas solidaritas yang terus dipelihara.
11. Teman-teman Rekayasa Konversi Energi Teknik Mesin FTI-ITS, terimakasih atas dukungan dan bantuannya selama ini.
12. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tesis ini, oleh karena itu saran dan masukan dari semua pihak sangat diharapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Juli 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK i

KATA PENGGANTAR v

DAFTAR ISI vii

DAFTAR GAMBAR ix

DAFTAR TABEL xiii

DAFTAR SIMBOL xv

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang..1

1.2 Perumusan Masalah...3

1.3 Batasan Masalah 3

1.4 Tujuan Penelitian..4

1.5 Manfaat Penelitian 4

BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka 5

2.2 Fenomena Aliran pada Kendaraan 13

2.3 *Diffuser*...16

2.4 *Computational Fluid Dynamics* (CFD) 17

BAB III METODE PENELITAN

3.1 Diagram Alir Penelitian 21

3.2 Geometri Model Uji 22

3.3 Domain dan *Meshing* 24

3.4 Variabel Penelitian 26

3.5 *Grid independence test* 27

3.6 Jadwal Penelitian 29

BAB IV ANALISA HASIL PENELITIAN
4.1 Performa *Multiple-Channel Diffuser* 31
4.1.1 *Pressure Coefficient (Cp)* 31
4.1.2 *Velocity Pathline* 36
4.1.3 *Vector Velocity* 39
4.1.4 *Pressure Contour* 46
4.1.5 *Velocity Profile* 49
4.1.6 Koefisien *Drag* dan *Lift* 59
4.2 Diskusi 61

BAB V PENUTUP
5.1 Kesimpulan 65
5.2 Saran 65

DAFTAR PUSTAKA 67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Grafik koefisien *drag* dan *lift* 6
Gambar 2.2 *Velocity pathline* tampak atas 7
Gambar 2.3 Variasi sudut *diffuser* pada bagian belakang kendaraan........................ 7
Gambar 2.4 Grafik sudut *diffuser* terhadap koefisien *total drag* dan *lift* 8
Gambar 2.5 *Rear under-body slicing* pada sudut β 9
Gambar 2.6 *Pressure contour* pada bagian belakang kendaraan dengan sudut β berbeda-beda 9
Gambar 2.7 Skema model uji 10
Gambar 2.8 koefisien *lift* terhadap non dimensional *ride height* 11
Gambar 2.9 Parameter utama pada model uji 12
Gambar 2.10 Perbandingan *drag* dengan *rear diffuser angle* pada hasil CFD dan eksperimen *wind tunnel* 12
Gambar 2.11 Konsep dasar *actively translating rear diffuser device* 13
Gambar 2.12 C_D rata-rata bedasarkan variasi 13
Gambar 2.13 Aliran disekitar kendaraan 14
Gambar 2.14 Gaya dan momen yang bekerja pada kendaraan 15
Gambar 2.15 Definisi *frontal area* A pada suatu kendaraan 16
Gambar 2.16 Tahapan dalam CFD 19
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian 21
Gambar 3.2 Geometri model uji 22
Gambar 3.3 Model bus tanpa multiple-channel diffuser pada pandangan isometrik . 23
Gambar 3.4 Detil pada bagian bawah belakang bodi bus tanpa *multiple-channel*..... 23
Gambar 3.5 Model pada domain komputasi... 24
Gambar 3.6 *Mesh* pada domain komputasi 24
Gambar 3.7 Skema pengukuran 25
Gambar 3.8 *Multiple channel diffuser*.. 26
Gambar 3.9 *Grid independence analysis*: *pressure coefficient upper surface bus* 28
Gambar 3.10 *Grid independence analysis*: *pressure coefficient upper surface bus* pada jarak 0,9 x/L 28
Gambar 4.1 Ilustrasi skema pengukuran *pressure coefficient* pada model bus ……32

Gambar 4.2 Grafik *pressure coeffi*cient bagian atas model bus 32
Gambar 4.3 Grafik pressure coefficient bagian bawah model bus 33
Gambar 4.4 Perbesaran grafik pressure coefficient pada bagian bawah model bus. (x/L = 0.8 - 1) 33
Gambar 4.5 Ilustrasi skema pengukuran *pressure coefficient* pada *ground.* 35
Gambar 4.6 Grafik *pressure coefficient* pada *ground..*...35
Gambar 4.7 Perbesaran grafik *pressure coefficient* pada *ground..* 36
Gambar 4.8 Ilustrasi skema pengukuran *pressure coefficient* pada *ground..* 36
Gambar 4.9. Velocity pathline pada midspan bus 37
Gambar 4.10 *Velocity pathline* pada *Y=0.5 bus height* 38
Gambar 4.11 Ilustrasi skema pengukuran *velocity profile* pada beberapa bidang dibelakang bodi model bus. 39
Gambar 4.12. *Velocity vector* pada *inlet diffuser,* x = 0.93L. 40
Gambar 4.13. *Velocity vector* pada bidang berjarak x = 1.1L. 41
Gambar 4.14. *Velocity vector* pada bidang berjarak x = 1.3L. 42
Gambar 4.15. *Velocity vector* pada bidang berjarak x = 1.5L. 43
Gambar 4.16. *Velocity vector* pada bidang berjarak x = 1.7L. 44
Gambar 4.17. *Velocity vector* pada bidang berjarak x = 1.9L. 45
Gambar 4.18 Ilustrasi skema pengukuran *tekanan* pada daerah *multiple-channel.*....46
Gambar 4.19. *Pressure contour* pada X= 0,93L (*diffuser inlet*). 47
Gambar 4.20. *Pressure contour pada X= 0,95L*...48
Gambar 4.21. *Pressure contour pada X= L* (*diffuser outlet*).....................................48
Gambar 4.22. Ilustrasi skema pengukuran *velocity profile* pada bidang simetri vertikal z = 0 49
Gambar 4.23. *Velocity profile* pada bidang simetri vertikal z = 0 di dalam daerah *wake.* (x = 1,1L). 49
Gambar 4.24. *Velocity profile* pada bidang simetri vertikal z = 0 di dalam daerah *wake.* (x = 1,3L). 50
Gambar 4.25. *Velocity profile* pada bidang simetri vertikal z = 0 di dalam daerah *wake.* (x = 1,5L). 51
Gambar 4.26. *Velocity profile* pada bidang simetri vertikal z = 0 di dalam daerah *wake.* (x = 1,7L). 51

Gambar 4.27. *Velocity profile* pada bidang simetri vertikal z = 0 di dalam daerah *wake.* (x = 1,9L). 52
Gambar 4.28. Ilustrasi skema pengukuran. beberapa variasi ketinggian titik pengukuran. 52
Gambar 4.29. Ilustrasi skema pengukuran. *velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/H = 0,5. 53
Gambar 4.30. *Velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/H = 0,5 di dalam daerah *wake.* (x= 1,1L) 53
Gambar 4.31. *Velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/H = 0,5 di dalam daerah *wake.* (x= 1,3L) 54
Gambar 4.32. *Velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/H = 0,5 di dalam daerah *wake.* (x= 1,5L) 54
Gambar 4.33. *Velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/H = 0,5 di dalam daerah *wake.* (x= 1,7L) 55
Gambar 4.34. *Velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/H = 0,5 di dalam daerah *wake.* (x= 1,9L) 55
Gambar 4.35. Ilustrasi skema pengukuran *velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/Gc = 0,5 56
Gambar 4.36. *Velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/Gc = 0,5 di dalam daerah *wake.* (x = 0,93L) 56
Gambar 4.37. *Velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/Gc = 0,5 di dalam daerah *wake.* (x = 1,1L) 57
Gambar 4.38. *Velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/Gc = 0,5 di dalam daerah *wake.* (x = 1,3L) 57
Gambar 4.39. *Velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/Gc = 0,5 di dalam daerah *wake.* (x = 1,5L) 58
Gambar 4.40. *Velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/Gc = 0,5 di dalam daerah *wake.* (x = 1,7L) 58
Gambar 4.41. *Velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/Gc = 0,5 di dalam daerah *wake.* (x = 1,9L) 59
Gambar 4.42. Grafik koefisien *Drag* 60
Gambar 4.43. Grafik koefisien *Lift* 60

Gambar 4.44. Perbandingan vektor kecepatan pada bidang di belakang model bus. .61
Gambar 4.45. Grafik perbandingan koefisien *Lift* 62
Gambar 4.46. Plotting koefisien Lift Hasil simulasi dan penelitian Jowsey & Passmore 62

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Literatur Penelitian Terdahulu 5
Tabel 2.2 Koefisien *drag* dan *lift* pada beberapa variasi sudut *diffuser* 8
Tabel 2.3 Penurunan *drag* pada kecepatan aliran 50 m/s untuk modifikasi bagian bawah kendaraan..9
Tabel 2.4 Definisi daerah *diffuser stall* 17
Tabel 3.1 Perbandingan jumlah *cells* pada tiap variasi *grid* 27
Tabel 3.2 Perbandingan nilai *drag* pada tiap variasi *grid*. 27
Tabel 3.3 Jadwal Penelitian 29
Tabel 4.1. Data perbandingan gaya dan koefisien *drag* serta *lift*...........................59
Tabel 4.2. Perbandingan koefisien *lift* hasil simulasi dengan Jowsey & Passmore....63
Tabel 4.3. Perbandingan *pressure force* dan *viscous force* dalam *drag*................63

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR SIMBOL

A	: *Frontal area* (m^2)
A_1	: *Channel length* (m)
B_1	: *Teeth height* (m)
C_D	: *Drag coefficient*
C_L	: *Lift coefficient*
C_p	: *Pressure coefficient*
F_D	: *Drag Force* (N)
F_L	: *Lift Force* (N)
G	: *Channel width* (m)
G_c	: *Ground clearance* (m)
H	: tinggi bus (m)
L	: panjang bis (m)
N	: *Diffuser length* (m)
R_{eL}	: *Reynold Number*
t	: *teeth width* (m)
V	: kecepatan fluida (m/s)
W	: Lebar bus (m)
β	: sudut *diffuser*
μ	: *dynamic viscosity* (Ns/m^2)
ρ	: massa jenis udara (kg/m^3)
υ	: viskositas kinematik (m^2/s)

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

`

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Bahan bakar minyak merupakan komoditas dunia dan dibutuhkan semua kalangan masyarakat. Kecenderungan harga minyak mentah yang tidak murah dan Indonesia yang sudah tidak lagi menjadi eksportir merupakan penyebab tingginya harga bahan bakar minyak di Indonesia. Dalam era yang semakin maju ini, mobilitas masyarakat semakin meningkat. Sehingga kebutuhan akan alat transportasi massal dan bahan bakar minyak pun meningkat. Antara 2010-2014, jumlah bus terus bertambah sekitar 1.61 persen di Indonesia [1]. Bandingkan dengan tahun sebelumnya (2013), pada 2014 terjadi peningkatan sekitar 4,92 persen. Konsumsi energi untuk transportsi menyatakan bahwa 88% disumbang oleh kendaraan darat dan 9 persen adalah milik bus [2]. Namun untuk hal efisiensi bahan bakar, bus masih kalah dibandingkan dengan mobil. Keadaan yang demikian memunculkan tantangan dalam hal penghematan bahan bakar dan jarak tempuh yang lebih jauh. Drag merupakan gaya yang mempengaruhi kemampuan daya tempuh kendaraan yang berimbas pada hemat atau tidaknya penggunaan bahan bakar. Selain *drag, downforce* juga memiliki peranan penting dalam bidang aerodinamika, khususnya dunia balap. *Downforce* yang cukup besar dapat memberikan traksi yang cukup besar pula pada kendaraan. Sehingga mampu meningkatkan waktu akselerasi dan mengurangi jarak pengereman. Many method can be done to increase the fuel efficiency such as aerodynamics modifcation which can increase about 2-8 percent [3]. Salah satu cara yang dapat ditempuh dalam pengurangan gaya *drag* kendaraan adalah penggunaan *diffuser* pada bagian belakang kendaraan. Namun pada umumnya penurunan drag menyebabkan penurunan *downforce*. Oleh karena itu perlu didesain geometri yang optimal untuk mencapai nilai drag dan *downforce* yang baik.

Widodo dan Karomah [4] melakukan studi numerik penambahan diffuser pada bus. Variasi sudut diffuser 0^o, 6^o, 12^o dan 18^o dipilih sebagai variabel penelitian. Persamaan RANS 3D-*steady* diselesaikan dengan kombinasi model turbulensi k-epsilon. Algoritma SIMPLE digunakan pada *pressure velocity*

`

coupling. Hasil penelitian menunjukkan bahwa koefisien *drag* dapat turun sekitar 2.3% dan *downforce* meningkat begitu besar, khususnya pada sudut *diffuser* 12^o.

Hu, dkk [5] dalam penelitiannya menyatakan bahwa *diffuser* adalah salah satu perlengkapan tambahan yang penting dalam aerodinamika kendaraan. Sudut *diffuser*, jumlah dan bentuk *separator,* bentuk ujung plat dan lain sebagainya merupakan beberapa parameter *difusser* yang akan mempengaruhi aliran udara pada bagian bawah kendaraan dan juga *wake*. *Diffuser* yang terpasang pada kendaraan jenis sedan akan memiliki pengaruh yang bervariasi tergantung pada sudut *difusser* itu sendiri. Ketika sudut *diffuser* meningkat, aliran pada bodi bawah kendaraan dan *wake* akan berubah dan saling berhubungan. Koefisien *drag* kendaraan akan menurun pada awalnya lalu meningkat, sementara koefisien *lift* akan menurun.

Hassan, dkk [6] melakukan penelitian tentang aspek-aspek berbeda analisis gaya *drag* mobil balap dan teknik penurunan gaya *drag* seperti modifikasi bagian bawah belakang bodi kendaraan dan pengaturan arah gas buang. Hasil penelitian menyebutkan bahwa gaya *drag* dapat berkurang hingga 22.13% dengan modifikasi bagian bawah belakang bodi dan 9,5% dengan pengaturan arah gas buang. Penelitian juga membuktikan bahwa area dan intensitas tekanan negatif bagian belakang kendaraan dapat diminimalkan.

Jowsey dan Passmore [7] meneliti performa diffuser datar dan *multiple-channel* dengan metode pengukuran gaya dan tekanan. 10 macam sudut *diffuser* (0, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 30^o) dan 8 *ride height* dijadikan variabel penelitian. *Downforce* maksimal terjadi pada sudut diffuser 13 dan 16^o. *Multiple-channel diffuser* menunjukkan tren hasil yang serupa dengan *diffuser* datar. Namun pada sudut diffuser 13^o dan diatasnya, *Multiple-channel diffuser* menunjukkan peningkatan *downforce,* dengan persentase meningkat seiring dengan peningkatan sudut diffuser.

Lai, dkk [8] melakukan penelitian pengaruh sudut *diffuser* secara eksperimen serta numerik terhadap *drag* dan struktur *wake* kendaraan. *Diffuser* merupakan faktor penting yang mempengaruhi struktur *wake* serta pada sudut tertentu dapat menurunkan *drag* serta memperbaiki struktur *wake.* Seiring dengan

`

meningkatnya sudut *diffuser, drag* mula-mula menurun namun selanjutnya meningkat. Sudut *diffuser* 12^{o} menunjukkan hasil yang paling optimal.

Kang, dkk [9] dalam penelitiannya menyatakan bahwa tekanan pada bagian bawah kendaraan meningkat dengan penggunaan *diffuser. Diffuser* mencegah udara bertekanan rendah yang melalui bagian bawah kendaraan melonjak. *Diffuser* juga menurunkan kecepatan udara pada bagian bawah kendaraan tetapi meningkatkan tekanannya, sehingga menyebabkan penurunan *drag.*

Beberapa penelitian yang disebutkan sebelumnya, menimbulkan gagasan untuk menerapkan *multiple-channel diffuser* pada bus. Penerapan *multiple-channel diffuser* yang cenderung tidak mengubah bentuk asli bodi bus diharapkan dapat menjadi opsi dalam optimalisasi *driving stability* dan penghematan bahan bakar.

1.2 Perumusan masalah

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan Widodo dan Karohmah [4], sudut *diffuser* 12^{o} merupakan sudut yang mampu menghasilkan performa aerodinamika yang optimal. Koefisien *Drag* dapat berkurang sekitar 2,3 % dan *downforce* pun meningkat cukup signifikan.

Pada literatur lain, penelitian Jowsey dan Passmore [7] menyatakan bahwa *multiple-channel diffuser* dapat meningkatkan *downforce* suatu kendaraan. Besarnya peningkatan *downforce* seiring dengan bertambahnya jumlah *channel* yang diterapkan.

Kedua penelitian diatas masing-masing memberikan informasi penting terkait besarnya sudut *diffuser* serta variasi jumlah *channel* pada modifikasi bodi. Sudut *channel* 12^{o} optimal mereduksi *drag* bus sedangkan jumlah *channel* 3 dan 4 memberikan kontribusi besar dalam peningkatan *downforce* kendaraan. Oleh karena itu, variasi 3 dan 4 *channel* akan diterapkan dalam penelitian ini guna optimalisasi gaya-gaya aerodinamika.

1.3 Batasan masalah

Penelitian dilakukan dengan beberapa batasan, diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Aliran fluida pada sisi *inlet* diasumsikan *uniform, incompressible* dan *steady.*

`

2. Aliran bersifat turbulen.
3. Model bus diadopsi dari penelitian Widodo dan Karohmah [1].
4. Efek ban pada simulasi ini diabaikan.
5. *Ground* tidak dianggap sebagai *moving wall.*

1.4 Tujuan penelitian

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah diatas, maka tujuan dari penelitian ini dibagi menjadi dua bagian, yaitu:

1. Tujuan umum:
    - Mengetahui interaksi aliran pada *simplified bus model* dengan sudut *diffuser* (β) 12^o dan ditambahkan dengan *multiple-channel*.
2. Tujuan khusus:

    Mengetahui karakterisitik aliran yang melintasi bodi bus secara kualitatif dan kuantitatif.

    a. Secara kuantitatif
        - *Pressure distribution coefficient* (Cp) pada *midspan* bus.
        - Koefisien *drag* dan *lift.*

    b. Secara kualitatif (visualisasi aliran)
        - *Velocity vector* dan *pathline* pada daerah *wake.*
        - Kontur tekanan dan intensitas turbulensi.

1.5 Manfaat penelitian

Beberapa manfaat yang diinginkan dari penelitian ini antara lain:

1. Mampu menggambarkan interaksi aliran dan mengetahui koefisien gaya aerodinamika pada bus yang dimodifikasi dengan *multiple-channel diffuser.*
2. Mampu mengetahui efek yang muncul dari penambahan *multiple-channel diffuser* pada bodi belakang bus.

BAB II
KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Beberapa penelitian tentang aerodinamika kendaraan serta pengaruh penambahan *diffuser* yang dapat dijadikan referensi dalam penelitian ini, ditunjukkan oleh tabel 2.1.

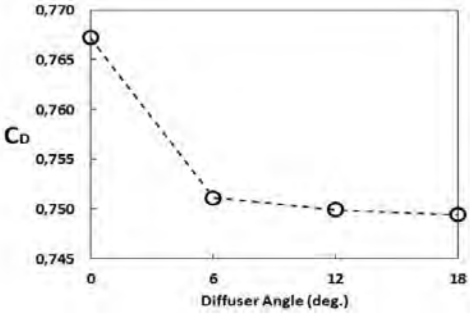
Tabel 2.1 Literatur Penelitian Terdahulu

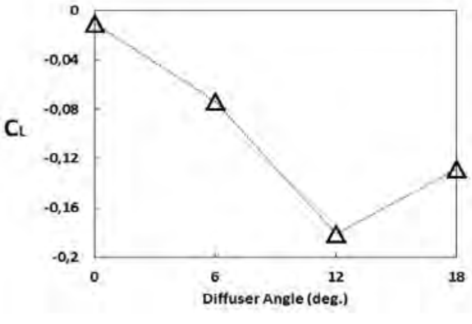
No	Nama Peneliti	Tahun	Metode	Hasil
1	Widodo & Karomah	2015	Numerik	Aerodinamika kendaraan dapat ditingkatkan dengan pengaruh dari sudut *diffuser*.
2	Hu, dkk	2011	Numerik	Sudut *diffuser* sangat berpengaruh terhadap *wake* dan aliran udara bawah pada bagian belakang kendaraan.
3	Hassan, dkk	2014	Numerik	Modifikasi bagian bawah kendaraan dapat mereduksi *drag* hingga 22.13% dan *diffuser* dapat mengurangi 9.5% *drag*.
4	Jowsey & Passmore	2010	Eksperimen	*Multiple channel diffusers* menunjukkan tren nilai *lift* dan *drag* yang hamper sama dibandingkan dengan *diffuser* datar. *Multiple channel* meningkatkan *downforce* pada sudut 13^o dan keatas.

5	Lai, dkk	2010	Ekperimen & Numerik	Gaya *Drag* kendaraan dipengaruhi oleh sudut *diffuser.* Seiring dengan peningkatan sudut *diffuser, drag* mula-mula akan menurun tetapi selanjutnya meningkat.
6	Kang, dkk	2011	Numerik	Berbagai variasi panjang *actively translating rear diffuser,* kasus 6 (450mm) menunjukkan penurunan *drag* paling baik, yaitu sekitar 4%.

Widodo dan Karomah [4] dalam penelitian yang berjudul *'CFD based investigations into optimization of diffuser angle on rear bus body'* melakukan kajian tentang variasi sudut *diffuser* yang diterapkan pada bagian belakang bus. Model uji digambarkan secara 3D namun hanya setengah bagian saja dikarenakan bentuk yang simetris. Simulasi dilakukan dalam kondisi *steady* dan dengan model turbulensi realizable k-epsilon.

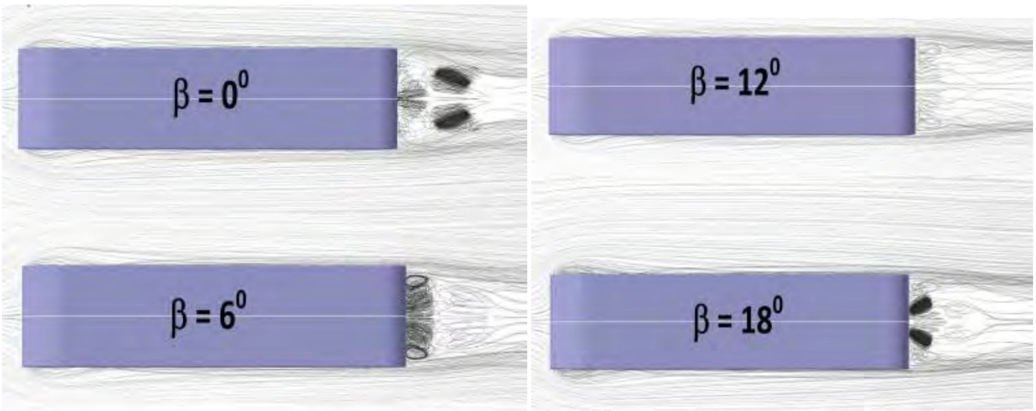
Hasil yang ditunjukkan oleh gambar 2.1 menunjukkan bahwa peningkatan besar sudut *diffuser* menghasilkan penurunan koefisien drag hingga sekitar 2.3%. Sedangkan *downforce* meningkat secara signifikan terutama pada sudut diffuser 12^o.





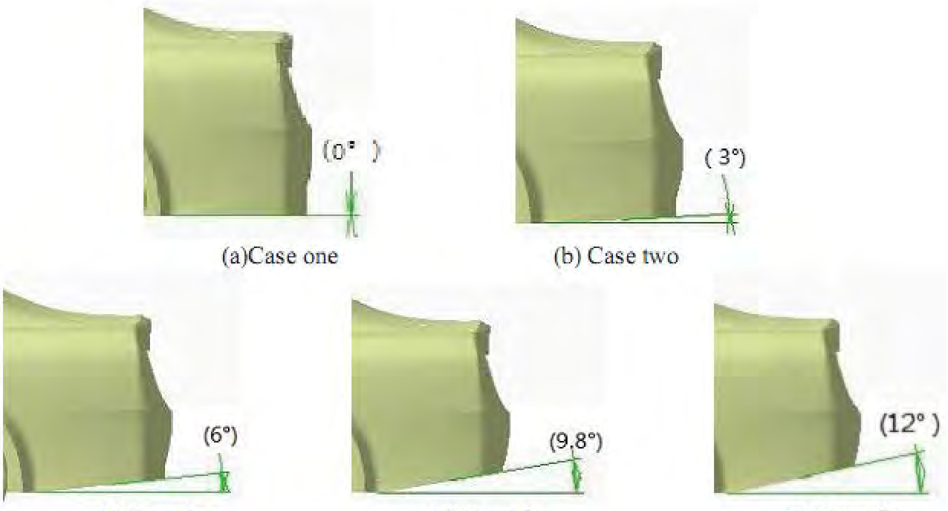
Gambar 2.1 Grafik koefisien *drag* dan *lift* [4]

Disamping itu, peningkatan besar sudut diffuser akan menigkatkan *mass flow* pada bagian bawah kendaraan. Hal ini disebabkan oleh aliran fluida dari samping kanan dan kiri kendaraan yang memasuki daerah diffuser. Aliran yang melewati diffuser dapat memperbaiki struktur pada bagian belakang kendaraan.



Gambar 2.2 *Velocity pathline* tampak atas [4].

Hu dkk [5] dalam jurnal berjudul *influence of different diffuser angle on sedan's aerodynamic characteristics* menganalisa tentang pengaruh besar sudut *diffuser* terhadap karakteristik aliran yang dihasilkan. Beberapa variasi besar sudut yang dilakukan pada penelitian ditunjukan pada gambar 2.3.

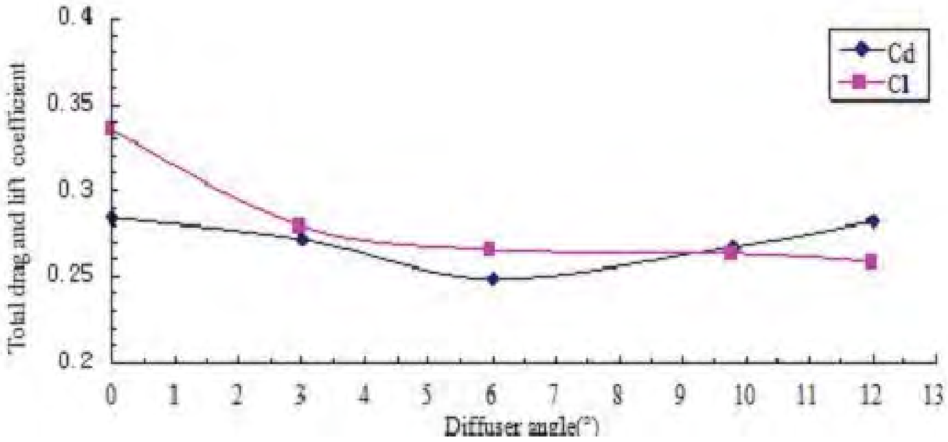


Gambar 2.3 Variasi sudut *diffuser* pada bagian belakang kendaraan [5].

Metode *Computational Fluid Dynamics* digunakan dalam penelitian tentang karakteristik aerodinamika kendaraan jenis sedan ini. Model digambarkan setengah bagian saja dikarenakan geometri model yang simetris dan untuk mendapat hasil yang lebih cepat.

Tabel 2.2. Koefisien *drag* dan *lift* pada beberapa variasi sudut *diffuser* [5].

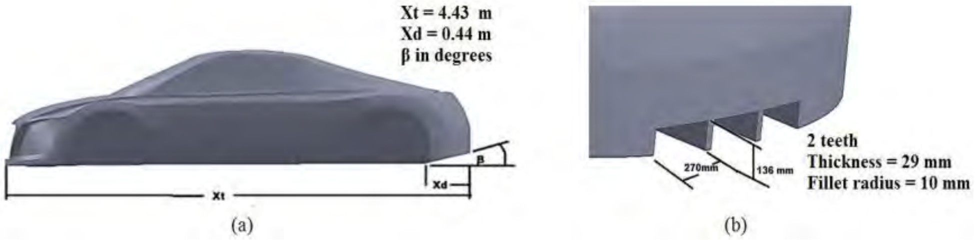
Case name	Diffuser angle	Cd	Cl
Case one	0°	0.2841	0.3350
Case two	3°	0.2718	0.2791
Case three	6°	0.2487	0.2656
Case four（original model）	9.8°	0.2673	0.2633
Case five	12°	0.2822	0.2586



Gambar 2.4 Grafik sudut *diffuser* terhadap koefisien *total drag* dan *lift* [5].

Gambar 2.4 dan tabel 2.2 menunjukkan hasil penelitian pengaruh sudut *diffuser* terhadap koefisien *lift* dan *drag* pada kendaraan jenis sedan. Hasil penelitian menunjukan bahwa koefisien *drag* kendaraan mula-mula turun lalu naik seiring dengan peningkatan sudut *diffuser,* sementara itu koefisien *lift* terus menurun.

Sedangkan Hassan dkk. [6] melakukan penelitian numerik untuk mengurangi koefisien *drag* pada mobil balap. Penelitian yang berjudul *Numerical study of aerodynamic drag reduction of racing cars* melakukan modifikasi pada bagian bawah kendaraan, penambahan difusser serta pengaturan arah gas buang kendaraan.

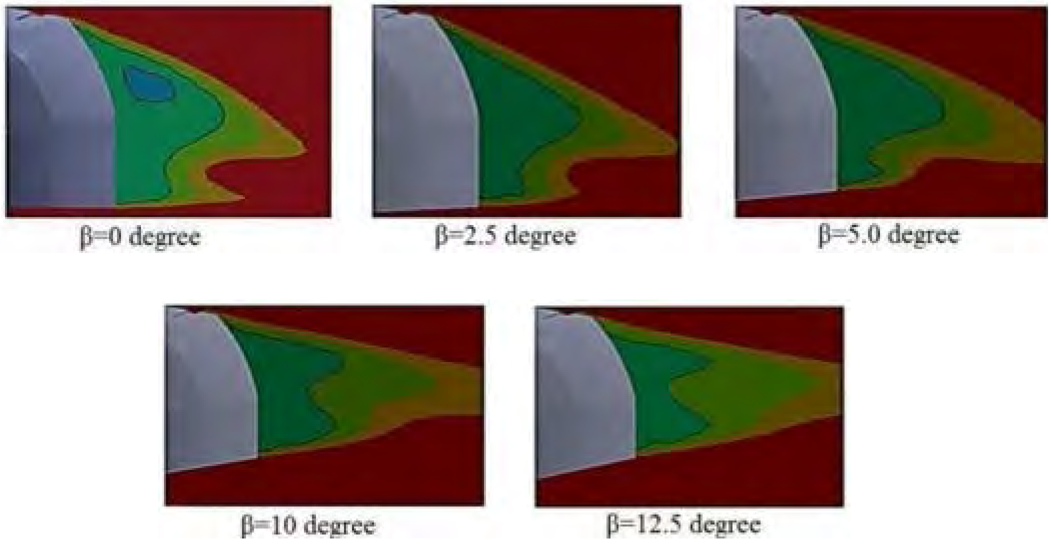


Gambar 2.5 (a) *Rear under-body slicing* pada sudut β. (b) *Diffuser* [6].

Drag force merupakan hasil dari perbedaan tekanan antara bagian depan dan belakang kendaraan. Ketika kecepatan kendaraan kendaraan meningkat, tekanan stagnasi meningkat dan tekanan pada bagian belakang menurun. Penelitian ini dilakukan pada kecepatan 50 m/s dimana nilai koefisien *drag* bernilai 0.3233 pada kondisi kendaraan tanpa modifikasi.

Tabel 2.3 Penurunan *drag* pada kecepatan aliran 50 m/s untuk modifikasi bagian bawah kendaraan [6].

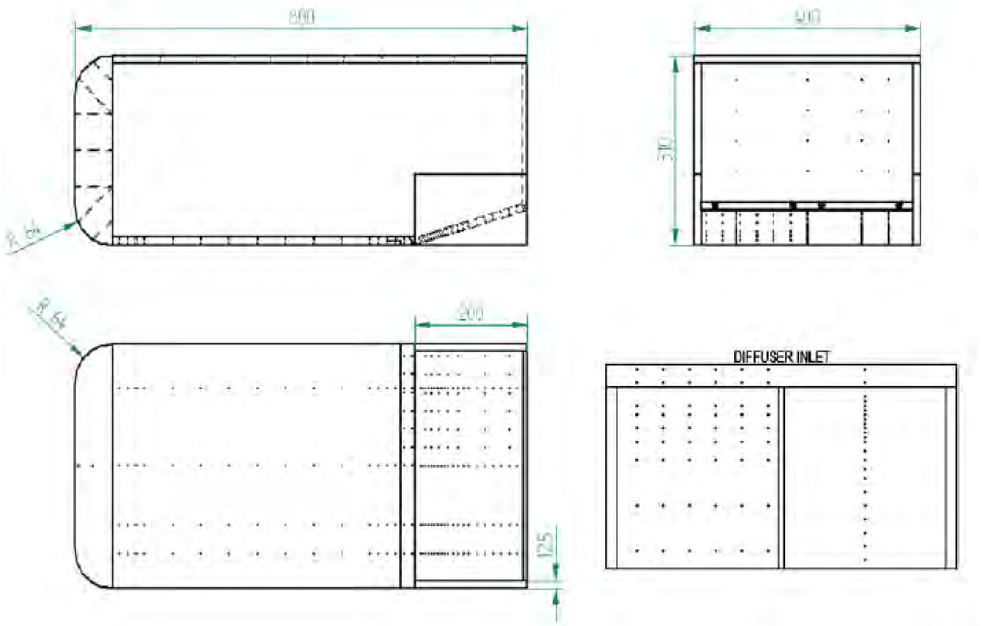
modifications	Descriptions of modifications	C_D	ΔC_D	% of reduction of C_D
None	-	0.3233	-	-
Modification1	β =2.5°, rear under-body sliced	0.3083	0.01500	4.639
Modification2	β =5.0°, rear under-body sliced	0.2962	0.02707	8.373
Modification3	β =10.0°, rear under-body sliced	0.2694	0.05386	16.58
Modification4	β =12.5°, rear under-body sliced	0.2517	0.07156	22.13
Modification5	β =12.5°, under-body diffuser	0.2926	0.03070	9.5



Gambar 2.6 *Pressure contour* pada bagian belakang kendaraan dengan sudut β berbeda-beda [6].

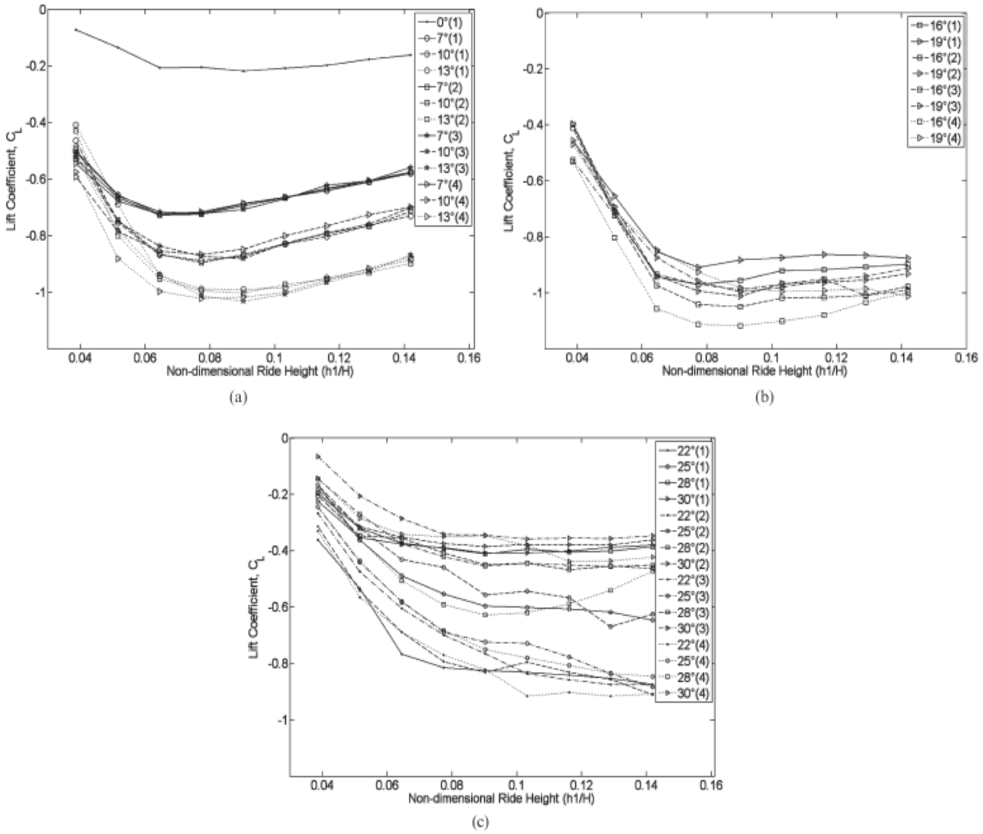
Pressure contour pada bagian belakang kendaraan ditunjukan oleh gambar 2.6. Daerah berwarna hijau yang terus berkurang seiring dengan meningkatnya sudut β. Hal ini menunjukkan bahwa daerah bertekanan rendah terus berkurang. Sedangkan tabel 2.3 menunjukkan persentase penurunan koefisien *drag* akibat dari pengurangan daerah bertekanan rendah.

Jowsey dan Passmore [7] melakukan penelitian pengaruh *multiple-channel diffuser* secara eksperimen dengan judul *Experimental study of multiple-channel automotive underbody diffusers.* 10 variasi sudut diffusers telah dilakukan yaitu 0, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 30^o serta 4 model *channel* yaitu 1, 2, 3 dan 4. Gambar 2.7 menunjukkan dimensi model uji.



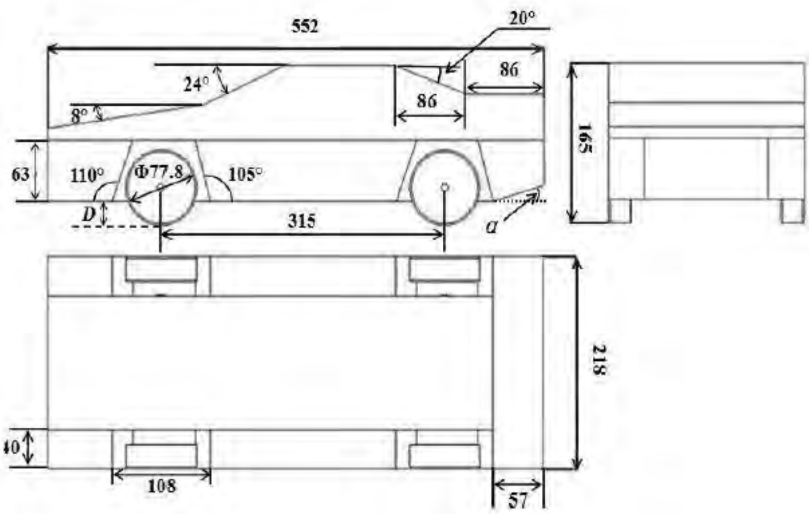
Gambar 2.7 Skema model uji [7]

Multiple-channel diffuser menunjukkan tren yang sama dengan *diffuser* datar dalam hal *drag idan lift.* Untuk sudut *diffuser* 13^o keatas, konfigurasi *multiple-channel* menunjukkan peningkatan *downforce*. Gambar 2.8 menunjukkan hasil dari *multiple channel diffusers.*



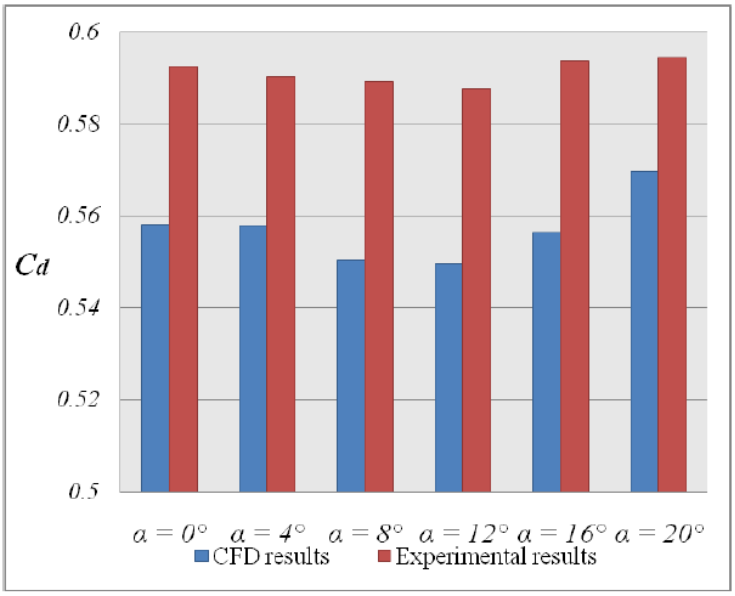
Gambar 2.8 koefisien *lift* terhadap non dimensional *ride height* (a) sudut *diffuser* kecil, (b) *midrange* dan (c) besar [8].

Eksperimen dan studi numerik yang dilakukan oleh Lai, dkk [8] dengan judul *experimental and numerical investigation on the influence of vehicle rear diffuser angle on aerodynamic drag and wake structure* menunjukkan bahwa *diffuser* merupakan faktor penting dalam mempengaruhi struktur *wake.* Sudut *diffuser* yang digunakan yaitu 0, 4, 8, 12, 16, dan 20^o serta *ground clearance* 20, 25, 30mm. geometri model uji ditunjukkan oleh Gambar 2.9.



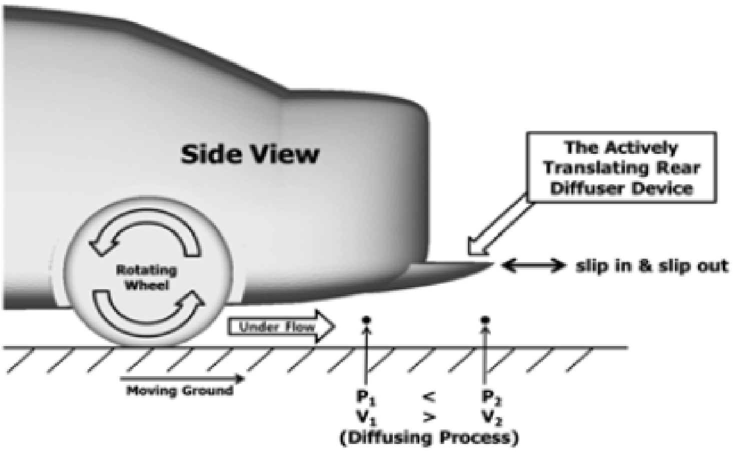
Gambar 2.9 Parameter utama pada model uji [8]

Diffuser dapat mempengaruhi aerodinamika kendaraan. Mula-mula semakin meningkat sudut *diffuser* akan menurunkan *drag* namun selanjutnya akan kembali meningkat. Fenomena tersebut ditunjukkan oleh gambar 2.10 baik pada hasil eksperimen maupun numerik.



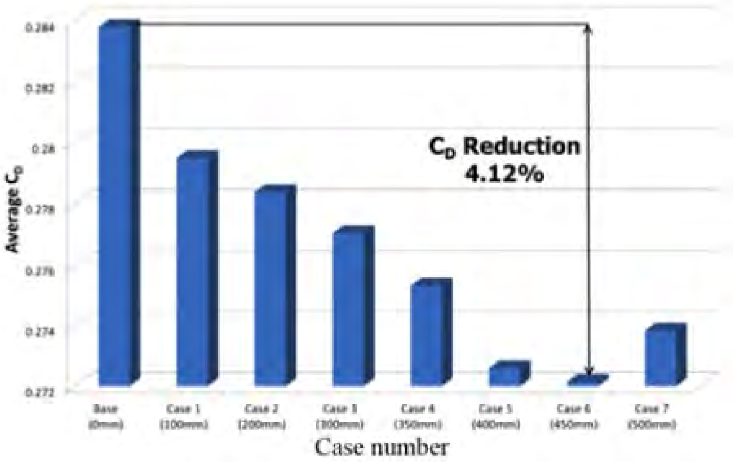
Gambar 2.10 Perbandingan *drag* dengan *rear diffuser angle* pada hasil CFD dan eksperimen *wind tunnel* [8]

Sementara itu penelitian Kang, dkk [9] berjudul *Actively translating a rear diffuser device for the aerodynamic drag reduction of a pas senger car* mengungkapkan bahwa *translating rear diffuser* dapat mereduksi *drag* hingga 4%. Model *actively translating diffuser* ditunjukkan oleh gambar 2.11



Gambar 2.11 Konsep dasar *actively translating rear diffuser device.* [9]

7 variasi panjang *diffuser* telah diteliti dan menunjukkan bahwa hasil terbaik ada pada variasi 6 (450mm). Gambar 2.12 secara detail memberikan perbandingan penurunan *drag* dari masing-masing variasi panjang *diffuser.*



Gambar 2.12 C_D rata-rata bedasarkan variasi. [9]

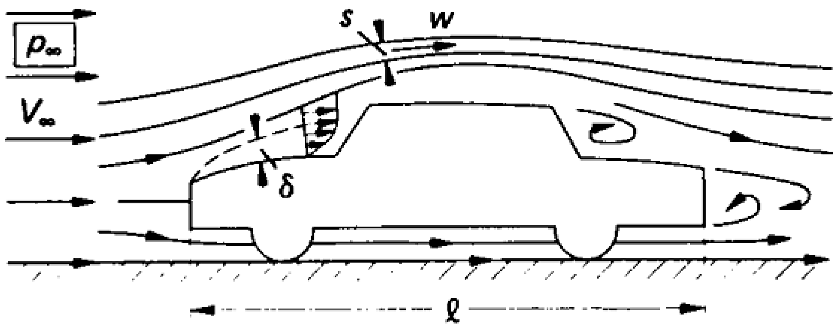
2.2 Fenomena aliran pada kendaraan

Proses aliran pada kendaraan yang bergerak terbagi ke dalam 3 kategori, yaitu:

- Aliran udara disekitar kendaraan
- Aliran udara yang melalui bodi kendaraan
- Proses aliran di dalam mesin.

Kategori 1 dan 2 yang disebutkan diatas sangat berkaitan. Kategori 1 merupakan aliran eksternal kendaraan dan erat hubingannya dengan aliran yang melalui ruang pada tiap-tiap bagian mesin. Oleh karena itu, aliran eksternal yang terjadi pada kendaraan sangat mempengaruhi kemampuan dan stabilitas kendaraan.

Aliran eksternal disekitar kendaraan ditunjukkan pada gambar 2.13. Pada kondisi udara lingkungan, kecepatan aliran bebas V_∞, adalah kecepatan kendaraan. Efek viskos pada fluida dibatasi pada suatu lapisan tipis dengan ketebalan beberapa milimeter saja yang disebut dengan *boundary layer* . Diluar lapisan ini merupakan aliran invisid, yaitu aliran yang tidak mendapat pengaruh dari viskositas fluida. Di dalam *boundary layer*, kecepatan menurun dari kecepatan aliran bebas V_∞ pada sisi terluar *boundary layer* menjadi 0 pada bagian dinding.



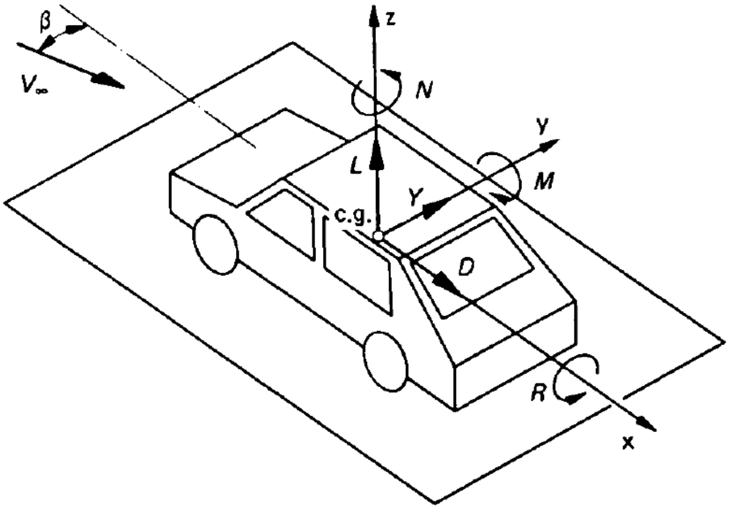
Gambar 2.13 Aliran disekitar kendaraan [10]

Konsep *boundary layer* hanya valid pada kondisi dimana suatu bilangan tak berdimensi cukup besar.

$$Re_l = \frac{\rho V_\infty}{\mu} l > 10^4 \qquad 2.1$$

Bilangan tak berdimensi ini disebut dengan bilangan *Reynolds*. Ini merupakan suatu fungsi dari kecepatan kendaraan V_∞, viskositas kinematik fluida μ dan juga panjang karakteristik kendaraan. Karakter dari aliran viskos tergantung pada bentuk bodi dan *Reynolds number* . Untuk *reynolds number* berbeda, bentuk aliran yang berbeda bisa terjadi pada bentuk geometri yang sama. Oleh karena itu, *reynolds number* merupakan parameter tak berdimensi yang mencirikan suatu aliran viskos.

Aerodinamika suatu kendaraan sangat terpengaruh oleh gaya-gaya dan momen yang bekerja. Gambar 2.14 menunjukkan skema gaya dan momen yang bekerja pada suatu kendaraan. Beberapa gaya dan momen yang bekerja pada kendaraan diantaranya *drag* (D), *lift* (L), *pitching moment* (M), *side force* (Y), *rolling moment* (R), dan *yawning moment* (N).

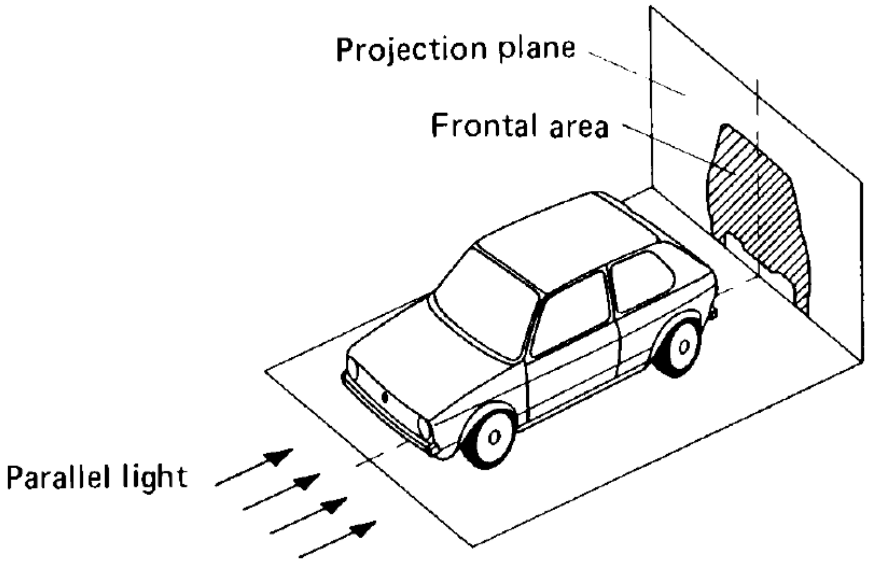


Gambar 2.14 Gaya dan momen yang bekerja pada kendaraan [10]

Tujuan utuma desain aerodinamika kendaraan ada untuk menghasilkan kendaraan yang cepat, stabil dan hemat bahan bakar. Dalam implementasinya tidak semua hal dapat diraih, namun dapat dicari nilai optimalnya. Dalam hal penghematan bahan bakar, aerodinamika kendaraan diharapkan mampu menghasilkan *drag* yang sangat rendah. Secara matematis koefisien *drag* ditunjukkan oleh persamaan 2.2

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{\rho}{2} V^2 A} \qquad 2.2$$

Dimana A adalah *frontal area* yang secara detil digambarkan oleh gambar 2.9.



Gambar 2.15 Definisi *frontal area* A pada suatu kendaraan [10]

Untuk stabilitas kendaraan suatu kendaraan erat sekali hubungannya dengan gaya *lift* yang terjadi. Suatu koefisien yang menunjukkan kemampuan kendaraan untuk terus menempel terhadap jalan adalah koefisien *lift.* Secara sistematis ditunjukkan oleh persamaan 2.3

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{\rho}{2}V^2 A} \qquad 2.3$$

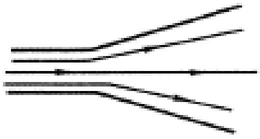
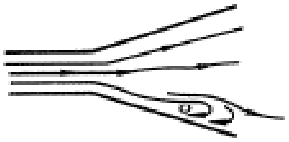
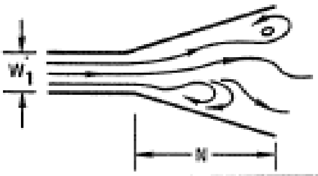
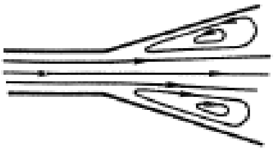
2.3 *Diffuser*

Diffuser adalah *duct* yang membesar. Tujuan utama *diffuser* adalah untuk memperbaiki tekanan statik fluida dengan mengurangi kecepatan alirannya. Fluida melambat ketika memasuki *diffuser*, dan sejumlah energi kinetik aliran dikonversikan menjadi energi potensial tekanan. *Diffuser* yang efisien adalah *diffuser* yang mampu mengkonversikan energi kinetik dalam jumlah besar menjadi tekanan.

Masalah yang kerap muncul dan menurunkan performa suatu *diffuser* adalah stall. *Diffuser stall* adalah separasi aliran dari dinding *diffuser*. *Diffuser stall* dapat digambarkan kedalam beberapa bentuk seperti yang ditunjukkan oleh tabel 2.4 untuk *diffuser* 2 dimensi. Profil aliran keluar *diffuser* dan perbaikan tekanan secara erat terpengaruh oleh kehadiran *diffuser stall*. Daerah *stall* dari aliran yang

terpisah dapat menghalangi aliran *diffuser*, dan menghasilkan aliran keluar yang tidak simetris dan *unsteady*. Sehingga secara garis besar, batas dari performa *diffuser* secara luas dipengaruhi oleh pertumbuhan *boundary layer* dan *stall*.

Tabel 2.4 Definisi daerah *diffuser stall* [11].

Description	Characteristics
1. Unstalled 	Flow follows diffuser contours. Flow is steady.
2. Appreciable Stall 	Flow generally follows diffuser contours. Boundary layers thicken. Small regions of separation and erratic flow are generally first seen in corners and they occupy no more than 1/5 of diffuser wall. There is little or no reverse flow.
3. Large Transitory Stall 	Flow is erratic with gross oscillation of pressure and overall flow pattern. Stalled regions with reverse flow form and then wash out. $N/W_1 < 4$: stalls occur on 1 diverging wall. $4 < N/W_1 < 12$: stalls occur on both diverging walls (shown). $N/W_1 > 16$: stalls occur on parallel walls.
4. Fully Developed Stall	Flow separates near throat and forms a large, stable, fixed eddy along one diverging wall while the flow follows second diverging wall. Near-steady flow with reverse flow in eddy. Eddy can be moved from one wall to the other wall only by large disturbances.
5. Jet Flow 	Incoming flow separates from both diffuser walls near throat and proceeds as a jet down diffuser. Large fixed eddies form on diverging walls. Flow is steady with substantial regions of reverse flow. Diffuser pressure recovery is very poor.

2.4 Computational Fluid Dynamic (CFD)

CFD (*computational fluid dynamics*) adalah sekumpulan metode numerik yang dipergunakan untuk mendapatkan pendekatan solusi suatu masalah dinamika fluida dan perpindahan panas.

Berdasarkan sudut pandang fisik, persamaan yang menggambarkan aliran fluida dan perpindahan panas dan massa merupakan versi sederhana dari hukum konservasi, yaitu :

- Konservasi *chemical species* (hukum konservasi massa)
- Konservasi momentum (hukum kedua Newton)
- Konservasi energi (hukum pertama termodinamika)

Dalam beberapa kasus, persamaan tambahan dibutuhkan untuk menghitung fenomena lain, seperti *entropy transport* (hukum kedua termodinamika).

Aerodinamika kendaraan diamati pada kondisi kritikal yaitu kondisi kecepatan tinggi. Pada kondisi kecepatan yang tinggi aliran eksternal kendaraan cenderung turbulen. Persamaan kontinuitas dan *Navier-Stokes* digunakan dalam kasus ini.

Persamaan kontinuitas menyatakan tentang keseimbangan massa pada kontrol volum, yang dituliskan sebagai berikut

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho\nabla.\boldsymbol{V} = 0 \qquad 2.4$$

dimana, ρ adalah densitas fluida, **V** adalah kecepatan aliran serta t adalah waktu. Sedangkan untuk persamaan *Navier-Stokes* dituliskan sebagai berikut

$$\rho\frac{D\boldsymbol{V}}{Dt} = -\nabla\rho + \mu\nabla^2\boldsymbol{V} + \rho\boldsymbol{f}. \qquad 2.5$$

Dimana µ adalah viskositas fluida, $\boldsymbol{f}$ adalah *body force.* Persamaan Navier-Stokes diselesaikan dengan bantuan persamaan *Realizable k-ε turbulance model* yang dituliskan sebagai berikut.

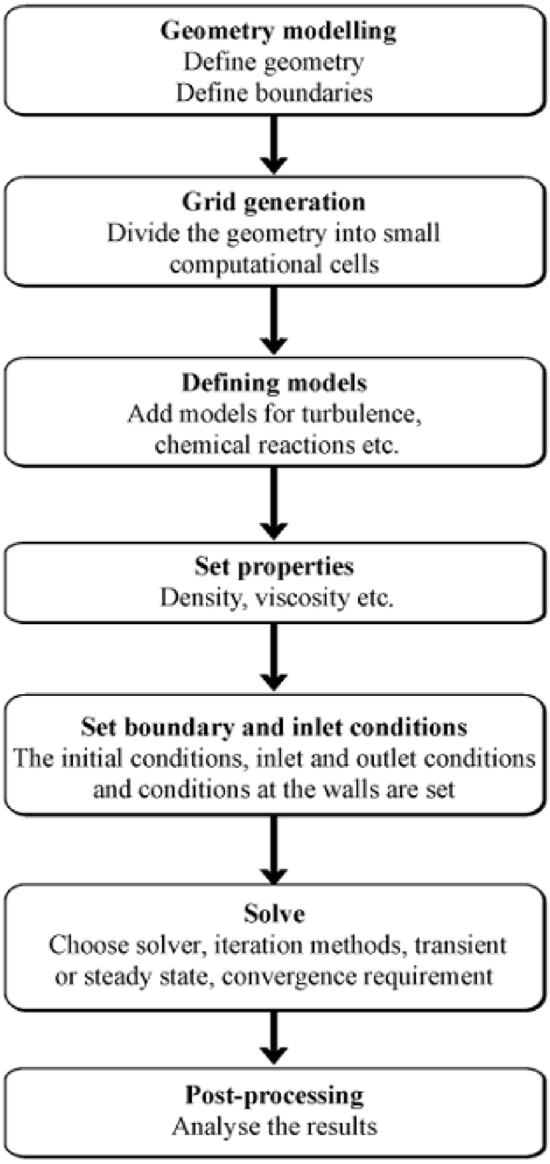
$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + div(\rho kV) = div\left[\frac{\mu_i}{\sigma_k}\, grad\ k\right] + 2\mu_i S_{ij}.S_{ij} - \rho\varepsilon \qquad 2.6$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + div(\rho\varepsilon V) = div\left[\frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon}\, grad\ \varepsilon\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}2\mu_i S_{ij}.S_{ij} - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad 2.7$$

Persamaan ini memiliki 5 konstanta yang dapat disesuaikan : C_μ, σ_k, σ_ε, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$. Persamaan k-ε model menggunakan nilai-nilai konstanta dengan penyesuaian komprehensif pada data untuk lingkup aliran turbulen yang lebih luas.

C_μ= 0.09 ; σ_k= 1.00 ; σ_ε= 1.20 ; $C_{1\varepsilon}$= 1.44 ; $C_{2\varepsilon}$= 1.9

Beberapa program *Computational Fluid Dynamic* yang digunakan untuk keperluan komersial diantaranya Fluent, CFX dan STAR-CD. Langkah-langkah yang ditempuh dalam menyelesaikan suatu kasus dengan CFD secara garis besar ditunjukkan oleh gambar 2.16.



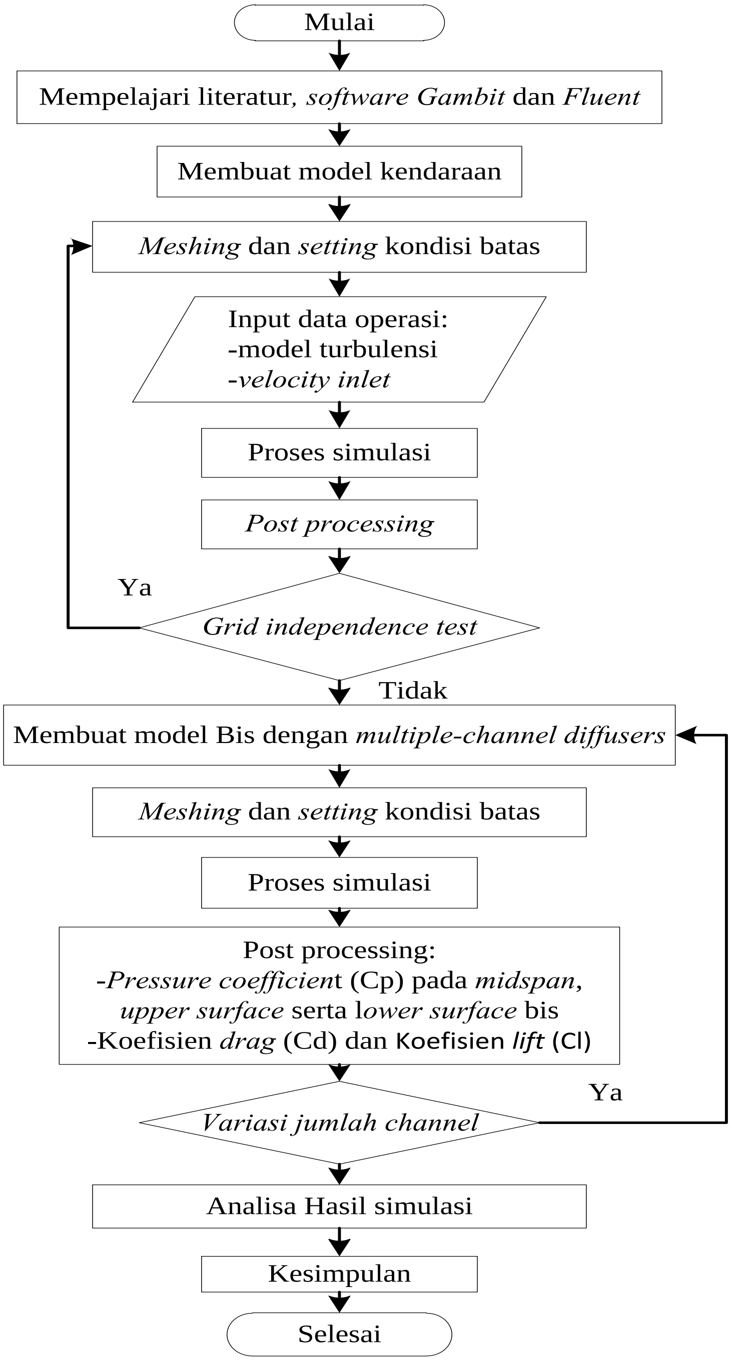
Gambar 2.16 Tahapan dalam CFD [12]

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Gambar 3.1 merupakan diagram alir yang menjelaskan tahapan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh *multiple channel diffuser* terhadap aerodinamika bus.

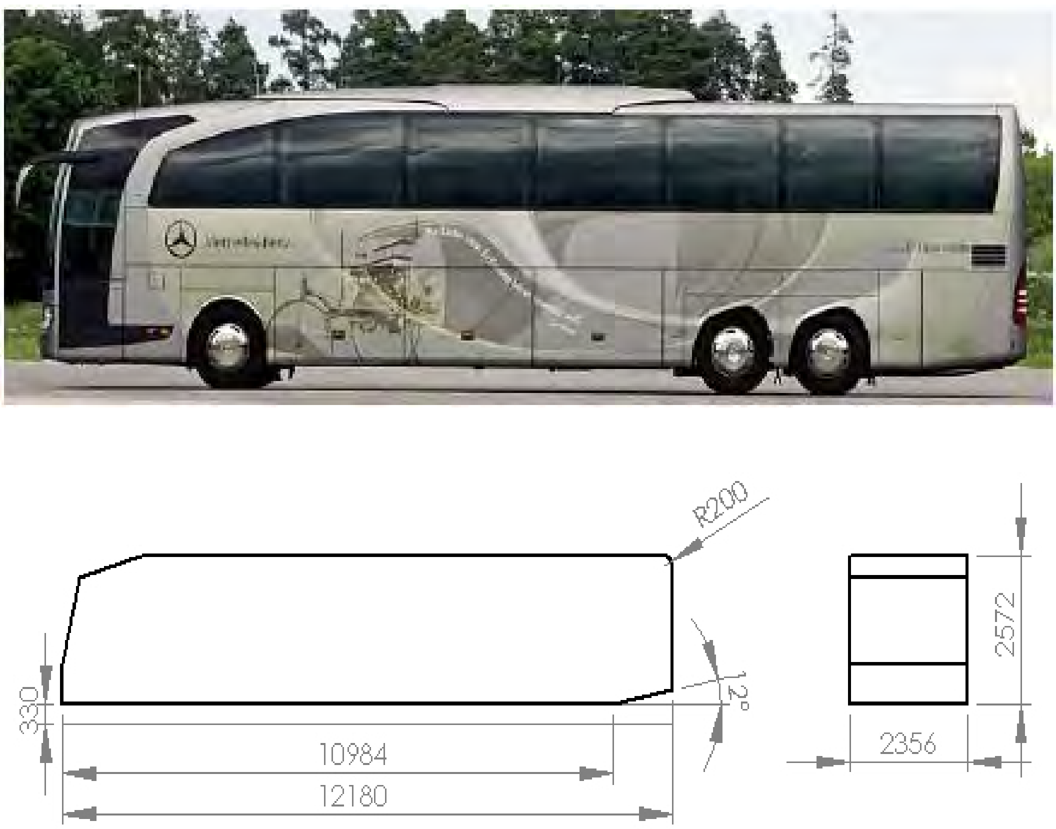


Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Geometri Model Uji

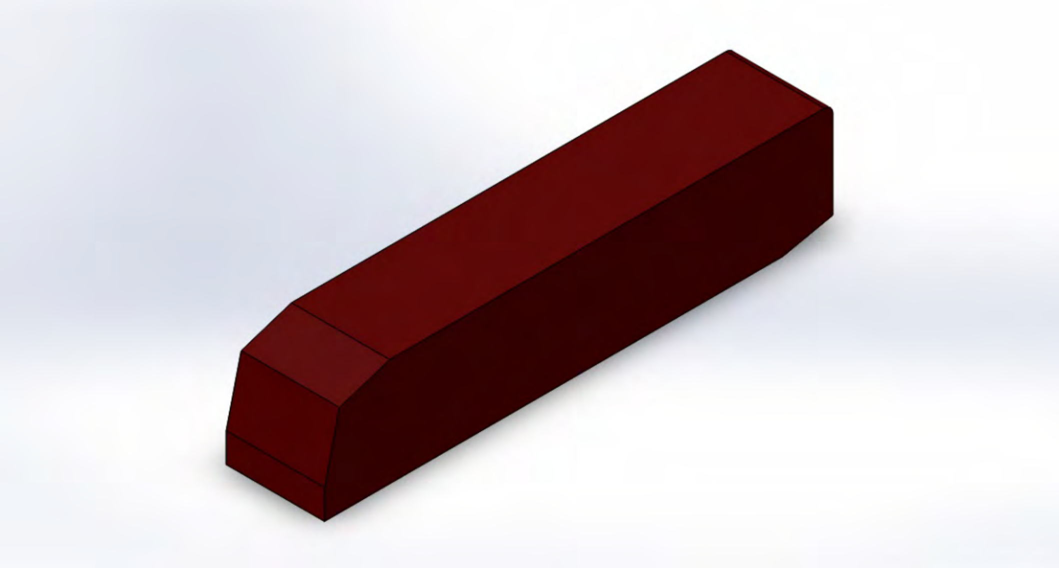
Model uji penelitian Widodo dan Karohmah [4] digunakan sebagai objek peneltian. Dimensi bus dan *tunnel* pada penelitian sebelumnya hanya menggambarkan setengah dari model uji dikarenakan bentuk yang simetris. Namun pada penelitian ini model dibuat dalam model penuh dikarenakan penambahan diffuser, model tak dapat dianggap simetris lagi. Model uji digambar menggunakan *software* Gambit. Beberapa ukuran geometri model uji antara lain:

- Panjang (L) = 12180 mm
- Lebar (W) = 2356 mm
- Tinggi (H) = 2572 mm
- *Diffuser angle (β)* = 12^{o}
- *Ground clearance* = 330 mm

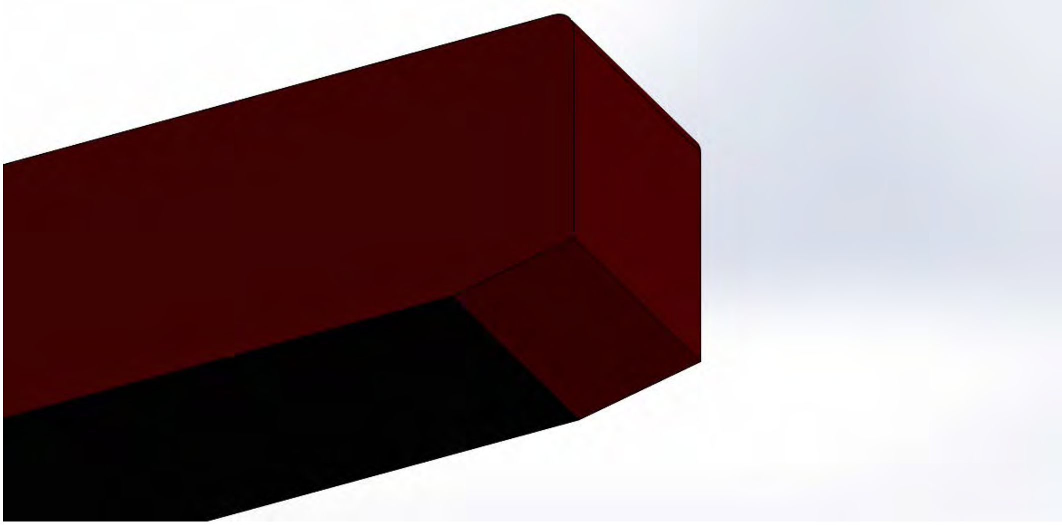


Gambar 3.2 Geometri model uji

Gambar 3.3 menunjukkan model bus secara keseluruhan dalam pandangan isometrik. *Close-up* pada bagian bawah belakang bodi bus yang dilengkapi *diffuser* ditunjukkan oleh gambar 3.4. Perbesaran pada bagian *diffuser* ditunjukkan sebagai gambaran awal dimana pada bahasan selanjutnya akan diterapkan *multiple-channel* pada bagian tersebut.



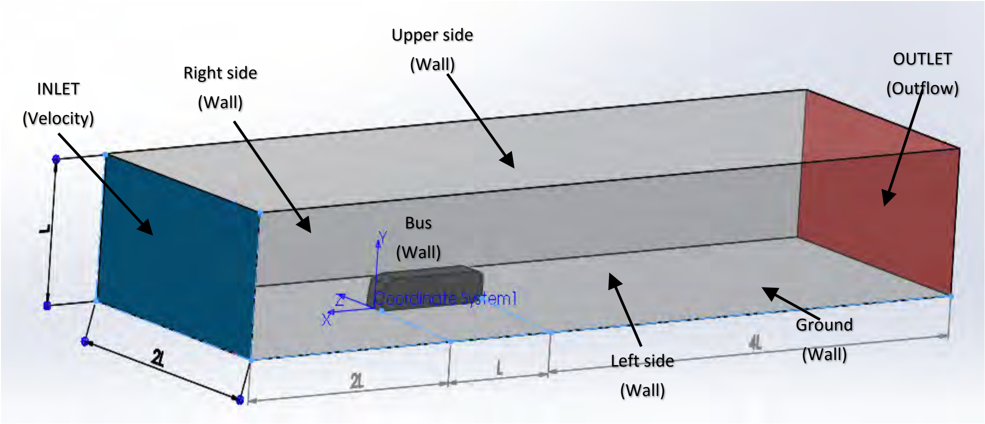
Gambar 3.3 Model bus tanpa *multiple-channel diffuser* pada pandangan isometrik



Gambar 3.4 Detil pada bagian bawah belakang bodi bus tanpa *multiple-channel*.

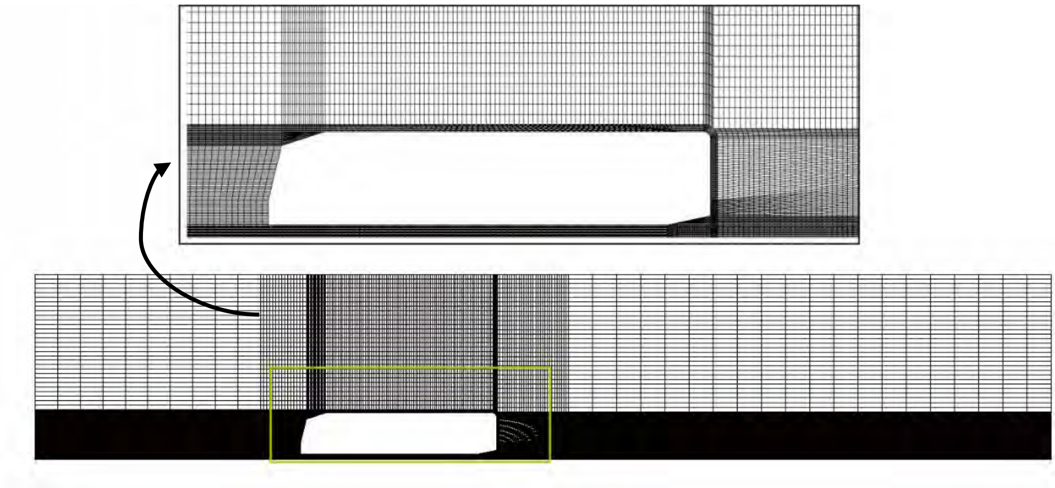
3.3 Domain dan *Meshing*

Penelitian ini dilakukan pada bilangan Reynolds $2.19x10^6$ pada kondisi *steady.* SIMPLE algorithm digunakan untuk *pressure velocity coupling* dan skema diskritisasi 2^{nd} order untuk *convection term* dan *viscous term. Setting boundary condition* ditunjukkan oleh gambar 3.5



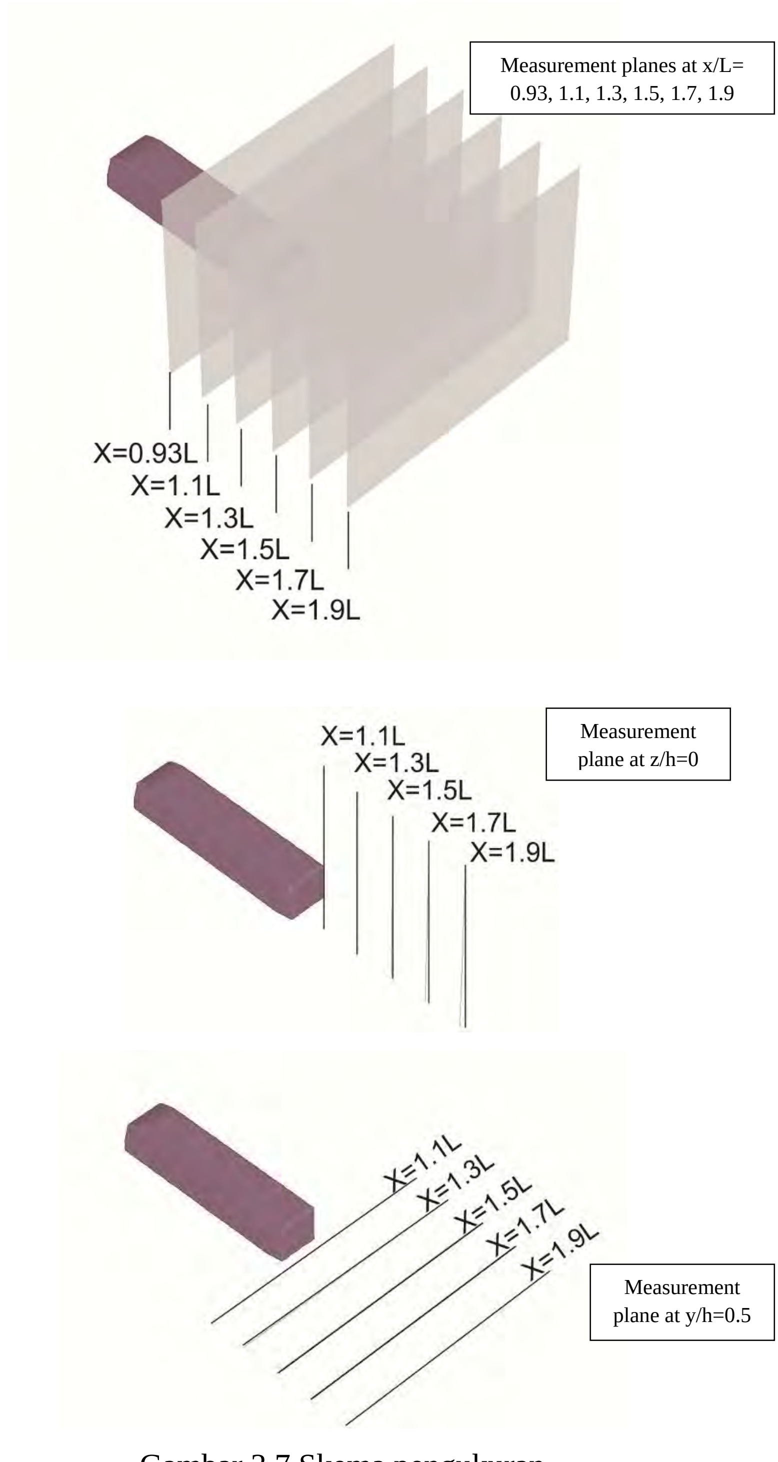
Gambar 3.5 Model pada domain komputasi

Meshing diciptakan untuk domain fluida menggunakan komponen *Meshing* yang disediakan pada Gambit. Bentuk meshing map hexagonal dipilih pada proses ini. Untuk meningkatkan ketepatan simulasi dan menunjukkan *wake* secara sempurna, meshing dibuat rapat pada daerah sekitar bus. seperti ditunjukkan pada Gambar. 3.6 *Mesh* yang sedikit rengang diterapkan pada daerah yang jauh dari bus dengan tujuan untuk meminimalkan waktu komputasi.



Gambar 3.6 *Mesh* pada domain komputasi

Untuk menunjukkan beberapa fenomena yang didapat dari penelitian ini. Data ditunjukkan dengan membuat beberapa bidang. Beberapa data yang akan diamati adalah berupa *velocity vector*, *pathline*, *contour*, koefisien *drag* dan *lift.* Gambar 3.7 menunjukkan daerah-daerah pengambilan data pada penelitian ini.

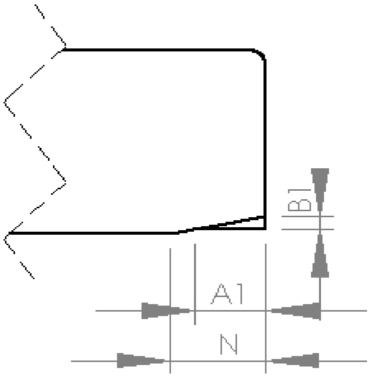


Gambar 3.7 Skema pengukuran

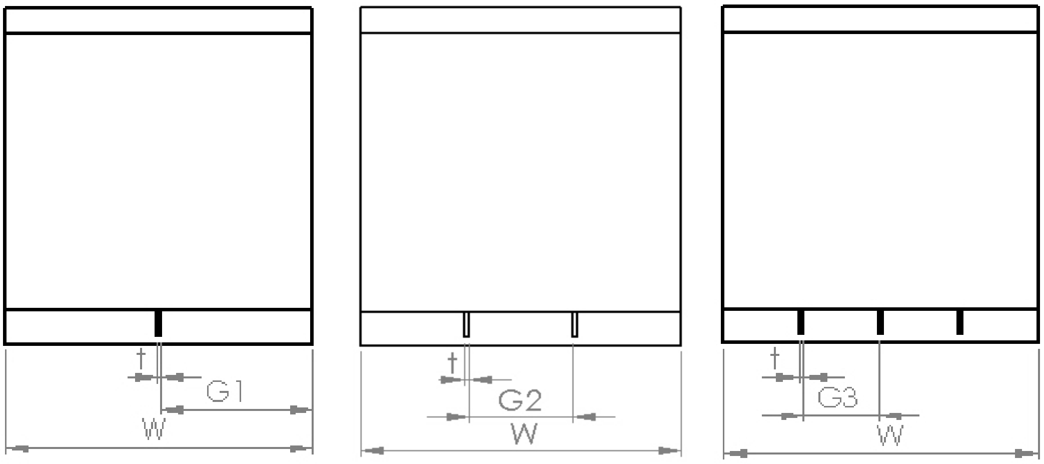
3.4 Variabel Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa variasi jumlah *diffuser.* Variasi jumlah *channel* yang dilakukan adalah 3 dan 4. Detail bentuk ditunjukkan oleh gambar 3.8

- Lebar Bus (W) = 2356 mm
- $\frac{A1}{N}$ = 0.75
- $\frac{t}{W}$ = 0.015
- $\frac{B1}{A1}$ = 0.21
- $\frac{G1}{W}$ = 0.49
- $\frac{G2}{W}$ = 0.32
- $\frac{G3}{W}$ = 0.24



a



b c d

Gambar 3.8 *Multiple channel diffuser*. a. Tampak samping; b. 2 Channel; c. 3 Channel; d. 4 Channel

3.5 Grid independence test

Grid independence test dilakukan dengan membuat 4 model *meshing* yang memiliki ukuran dan jumlah grid yang berbeda. Beberapa parameter yang dijadikan bahan perbandingan adalah nilai koefisien *drag* dan *lift* serta *pressure coefficient* pada *upper body* bus.

Tabel 3.1. Perbandingan jumlah *cells* pada tiap variasi *grid*

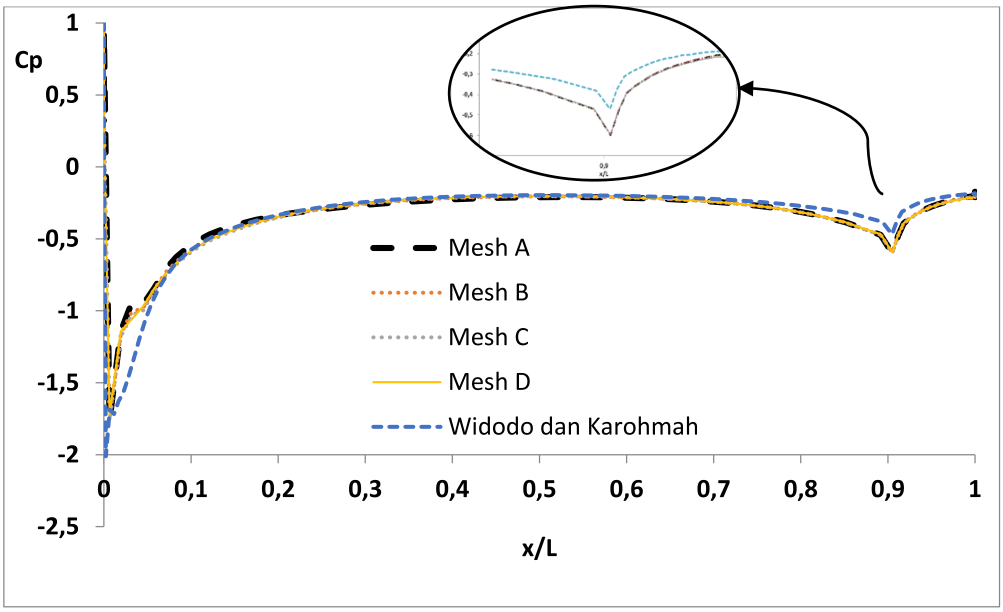
Model Uji	*Cells*	*Faces*	*Nodes*	Nilai y+
Mesh A	445750	1359875	468537	203.7679
Mesh B	668625	2034200	697132	199.1258
Mesh C	1261500	3828225	1305487	199.7358
Mesh D	1483000	4499925	1534187	199.7271

Tabel 3.1 menunjukkan kisaran nilai y^+ rata-rata yang cenderung sama. Nilai y^+ mesh A sampai dengan D berada pada nilai 199 hingga 204. Hal ini menandakan bahwa hasil perhitungan hanya berada pada *turbulent outer layer.*

Tabel 3.2. Perbandingan nilai *drag* pada tiap variasi *grid*.

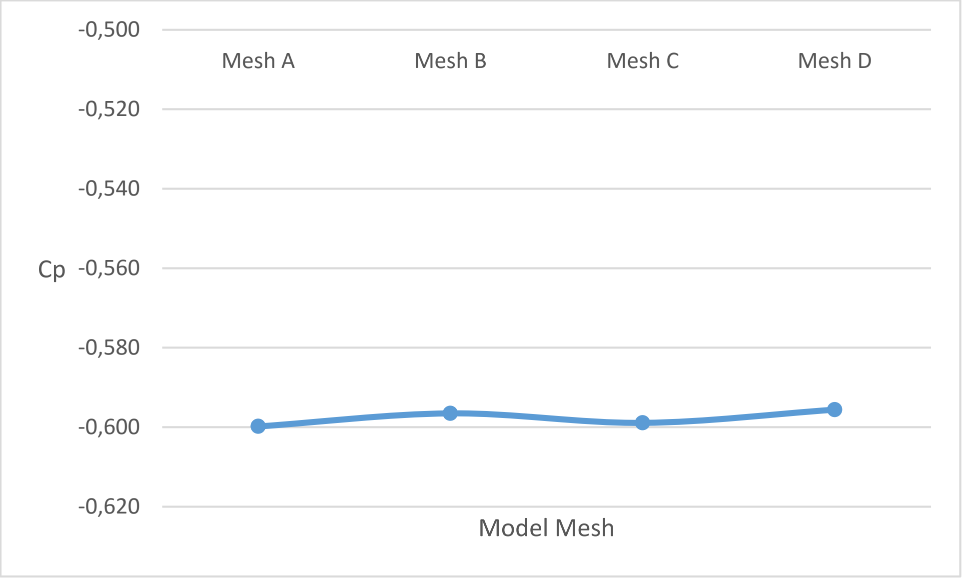
Model Widodo & Karohmah [4]	Koefisien *Drag*	
	0.7496	
Model mesh	Prediksi	Error
A	0.7603	1.42%
B	0.7422	0.98%
C	0.7420	1.01%
D	0.7413	1.11 %

Tabel 3.2 menunjukkan prediksi nilai koefisien *drag* beserta *error* perhitungan. Setiap variasi *mesh* menunjukkan hasil yang beragam. *Error* perhitungan yang muncul pada setiap variasi *mesh* berada pada kisaran 1%. *Mesh* B mampu memberikan hasil yang paling baik dalam memprediksi koefisien drag, dengan nilai error 0.98%.



Gambar 3.9 *Grid independence analysis*: *pressure coefficient upper surface bus*.

Gambar 3.9 menunjukkan *pressure coefficient* pada *upper surface* bus. Setiap variasi *mesh* menunjukkan hasil yang *under-predicted,* namun secara tren terlihat kesamaan. Semua variasi mesh menunjukkan hasil yang identik sehingga secara umum dapat digunakan.



Gambar 3.10 *Grid independence analysis*: *pressure coefficient upper surface bus* pada jarak 0,9 x/L

Gambar 3.10 menunjukkan nilai *pressure coefficient upper surface* bus pada jarak 0,9 x/L. Garis yang terbentuk antara *mesh* B hingga D seperti garis lurus.

Hal ini menandakan bahwa perhitungan sudah mendekati konstan. Dengan *grid independence* yang telah dilakukan artinya perhitungan yang nanti akan dilakukan oleh *software CFD* sudah tidak bergantung pada jumlah *mesh* yang ditentukan.

Berdasarkan *grid independence test* yang telah dilakukan serta pertimbangan waktu iterasi dan nilai *error* yang muncul, maka mesh B dianggap paling cocok digunakan dalam simulasi ini.

3.6 Jadwal Penelitian

Tabel 3.3 Jadwal Penelitian

Kegiatan	**I**				**II**				**III**				**IV**				**V**				**VI**			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi pustaka & literatur																								
Pembuatan domain simulasi & meshing																								
Setting program																								
Validasi																								
Grid independence test																								
Variasi model																								
Running program & *Post processing*																								
Penulisan Laporan																								
Sidang proposal tesis																								
Sidang tesis																								

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB IV

ANALISA HASIL PENELITIAN

Studi numerik pada original bus (tanpa *multiple-channel*) merupakan tahapan awal dalam penelitian ini dan dilanjutkan dengan penambahan *multiple channel* pada bodi bagian belakang bus. Original bus yang dimaksudkan adalah bus dengan sudut *diffuser* konstan 12^o tanpa penambahan *multiple channel*. Pada bab ini akan ditunjukkan data hasil penelitian berupa *pressure contour, drag, lift coefficient* serta fenomena-fenomena aliran yang terjadi disekitar bodi bus serta pengaruh *multiple-channel diffuser*.

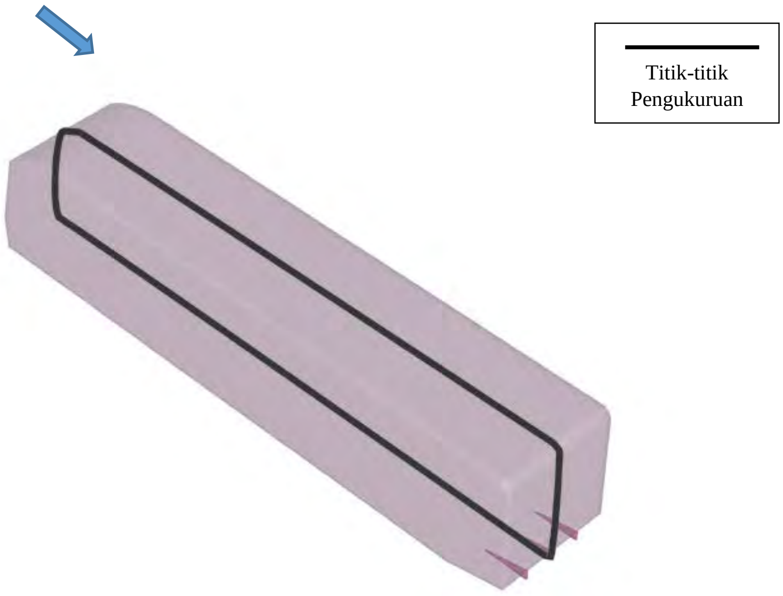
4.1 Performa *Multiple-Channel Diffuser*

4.1.1 *Pressure Coefficient* (Cp)

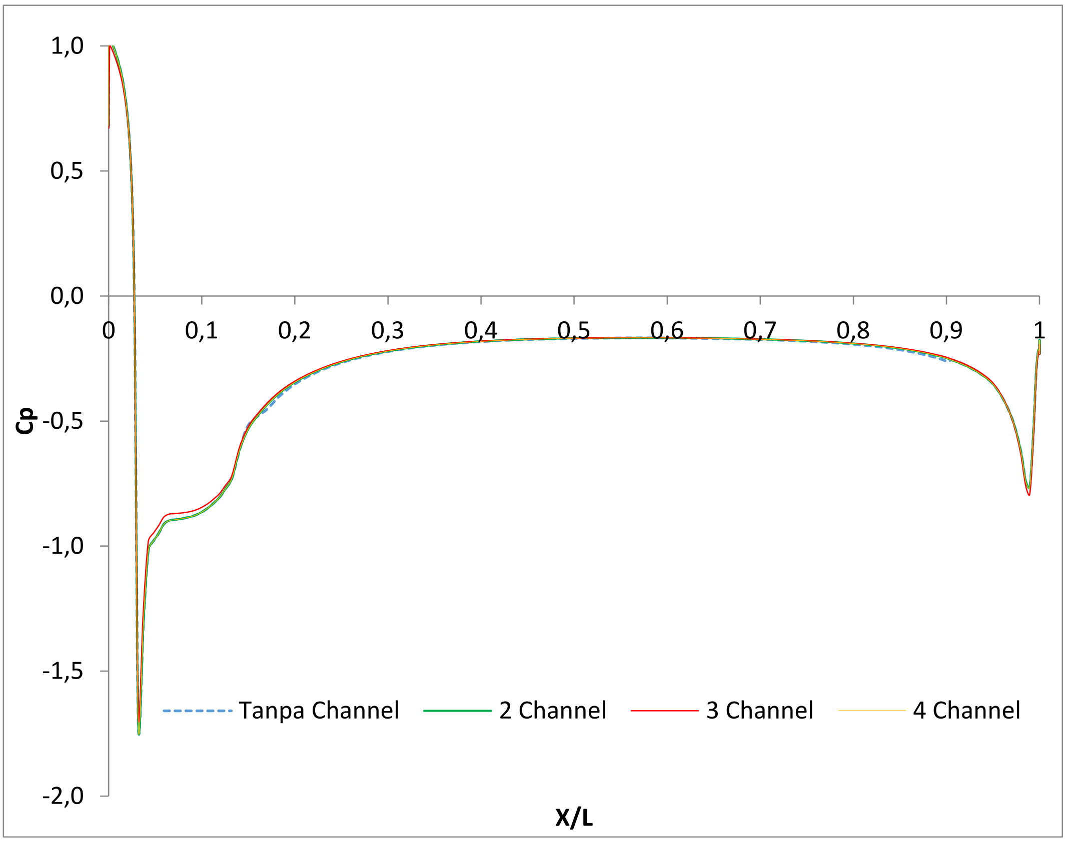
Multiple-channel diffuser telah diteliti dapat meningkatkan performa kendaraan dengan memperbaiki struktur aliran dan *pressure recovery* pada bagian belakang kendaraan. *Multiple-channel diffuser* membagi aliran sehingga memperbaiki *pumping* pada bagian *inlet diffuser* dan meningkatkan *pressure recovery* pada bagian *outlet diffuser*. Sebagai perbandingan hasil, *diffuser* 12^o tanpa *channel* akan dijadikan *baseline.*

Data berupa *pressure coefficient* (Cp) pada bagian atas dan bawah model bus tanpa *channel* serta *channel* 2, 3 serta 4 ditunjukkan oleh Gambar 4.2 dan 4.3. Sedangkan skema pengukuran ditunjukkan oleh Gambar 4.1. Lokasi pengukuran diambil sepanjang *midspan* model bus.

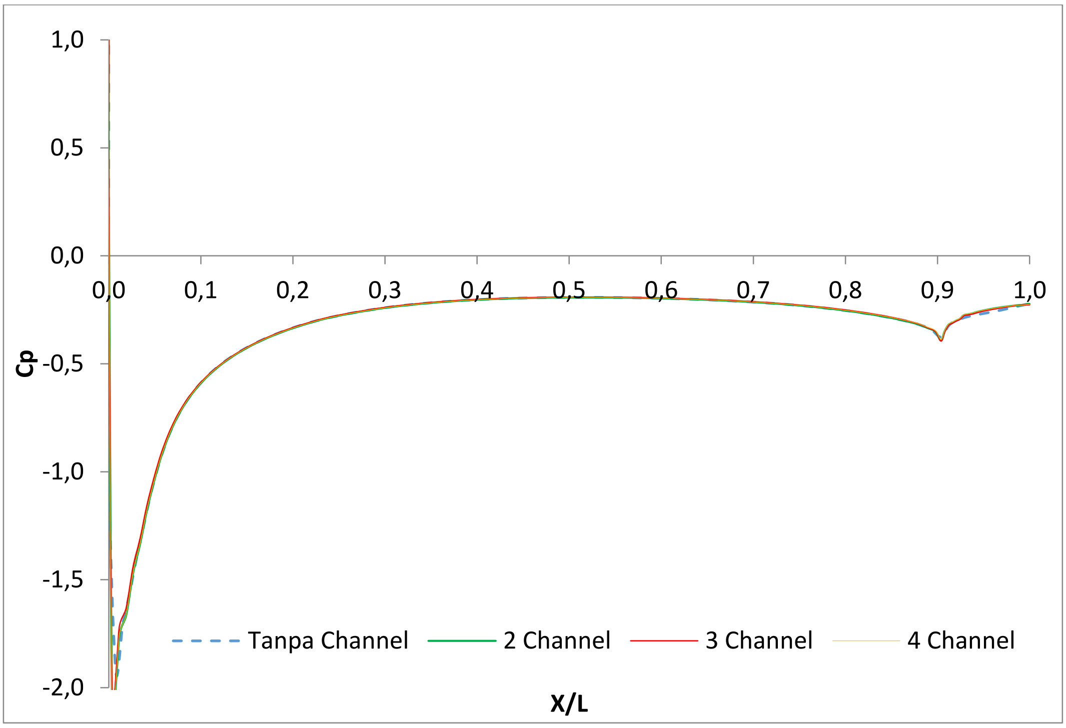
Grafik *pressure coefficient* (Cp) yang muncul secara umum antara *diffuser* tanpa *channel* dengan *multiple-channel diffusers* memilki tren yang mirip. Beberapa *stagnantion point* pada bagian depan model bus, percepatan pada bagian bawah model bus yang selanjutnya pada bagian *diffuser* akan terjadi *pressure recovery*. Hal ini menandakan bahwa penambahan *channel* pada *diffuser* tidak banyak mengubah fenomena *diffuser* pada umumnya. Perubahan yang sangat mungkin diamati dan cukup memberi penjelasan tentang pengaruh *channel* dapat dilihat dengan pengamatan mendetil pada beberapa *section* di sekitar *diffuser*.



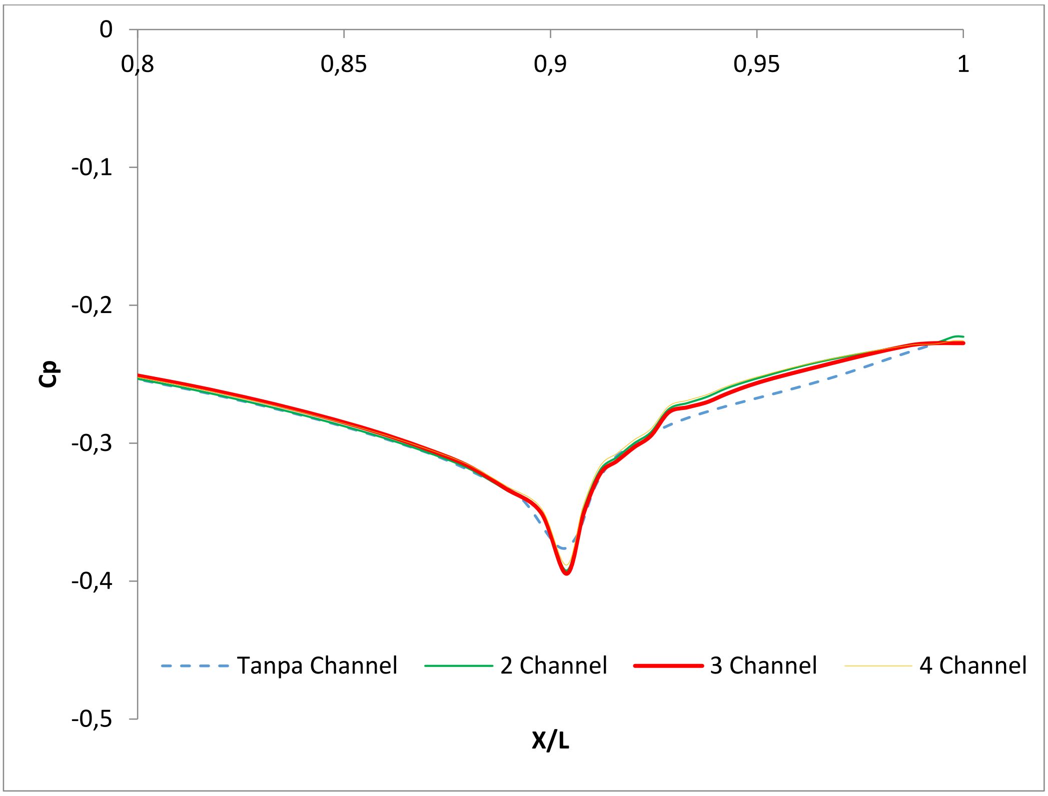
Gambar 4.1 Ilustrasi skema pengukuran *pressure coefficient* pada model bus.



Gambar 4.2 Grafik *pressure coefficient* bagian atas model bus.



Gambar 4.3 Grafik *pressure coefficient* bagian bawah model bus.



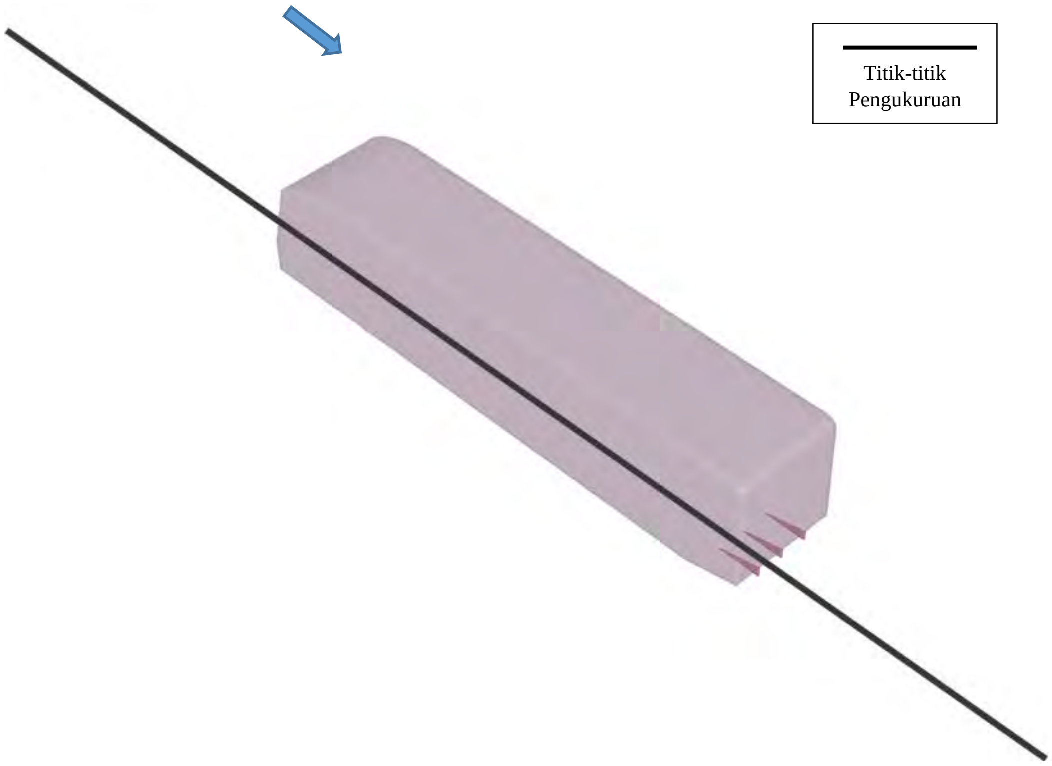
Gambar 4.4 Perbesaran grafik *pressure coefficient* pada bagian bawah model bus. (x/L = 0.8 - 1)

Gambar 4.4 merupakan perbesaran pada daerah *diffuser* dengan rentang jarak x/L=0.8–1 pada bagian bawah model bus. Pengamatan mendetil *pressure coefficient* pada bagian *diffuser* menunjukkan cukup perbedaan. Bagian *inlet diffuser* memiliki nilai *pressure coefficient* yang cenderung semakin rendah dengan pengaruh *channel.* Sedangkan bagian *outlet diffuser* memiliki nilai *pressure* coefficient yang lebih besar dibandingkan dengan *diffuser* tanpa *channel*.

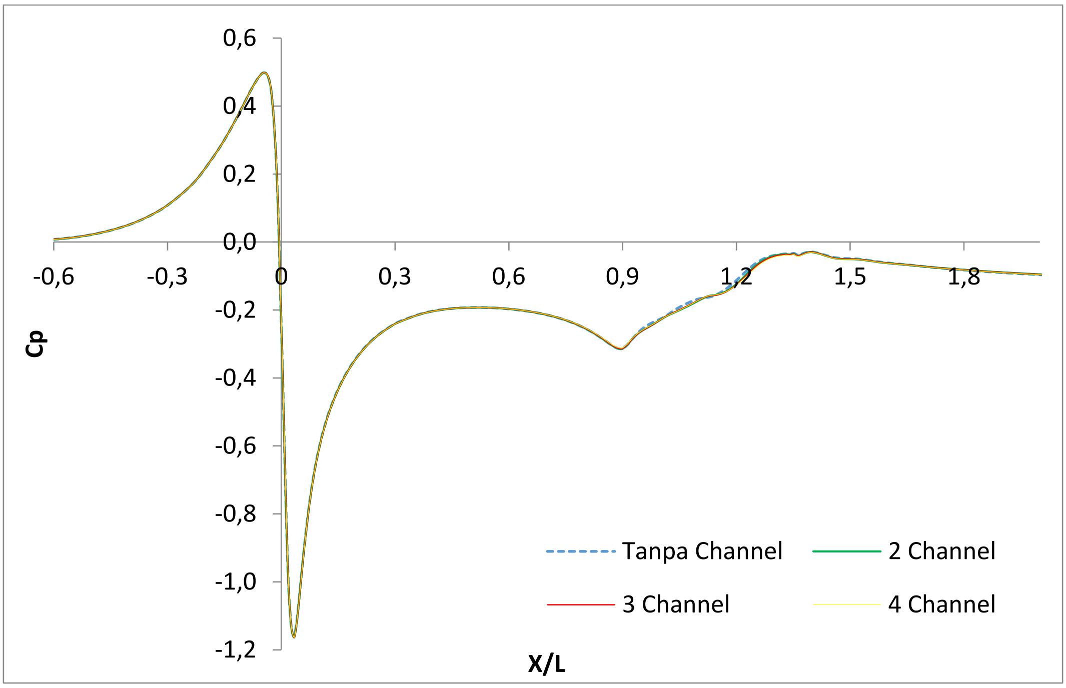
Daerah sebelum dan menuju *diffuser inlet* terjadi fenomena yang mirip dengan fenomena pada *nozzle.* Luas area mula-mula besar lalu semakin menyempit. Penyempitan luas area ini menyebabkan energi tekanan dikonversikan menjadi energi kinetik sehingga terjadi peningkatan kecepatan. Gambar 4.4 pada x/L = 0.9 merupakan tepat bagian *inlet diffuser* dan memiliki nilai Cp yang sangat rendah. Hal ini menandakan bahwa tekanan pada bagian tersebut tiba-tiba menjadi lebih rendah jika dibandingkan saat sebelum dan sesudah melewati *inlet diffuser*. Tanda minus (-) menunjukkan bahwa tekanan pada daerah tersebut jauh lebih rendah dibandingkan dengan tekanan lingkungan. Penurunan tekanan menandakan bahwa terjadi perbaikan performa *diffuser pumping.*

Selepas melewati *diffuser inlet,* nilai Cp akan berangsur-angsur naik hingga menuju daerah *outlet diffuser*. Peningkatan Cp ini menandakan energi kinetik berupa kecepatan dikonversikan menjadi tekanan akibat dari luas area yang semakin bertambah. Nilai Cp antara *diffuser* tanpa *channel* cenderung lebih rendah dibandingkan dengan *multiple-channel diffuser*s. Hal ini menunjukkan bahwa *multiple-channel diffuser*s memberikan *pressure recovery* yang lebih baik dibandingkan dengan *diffuser* tanpa *channel*. *Pressure recovery* ini akan memberikan kontribusi yang baik dalam hal peningkatan performa aerodinamika kendaraan.

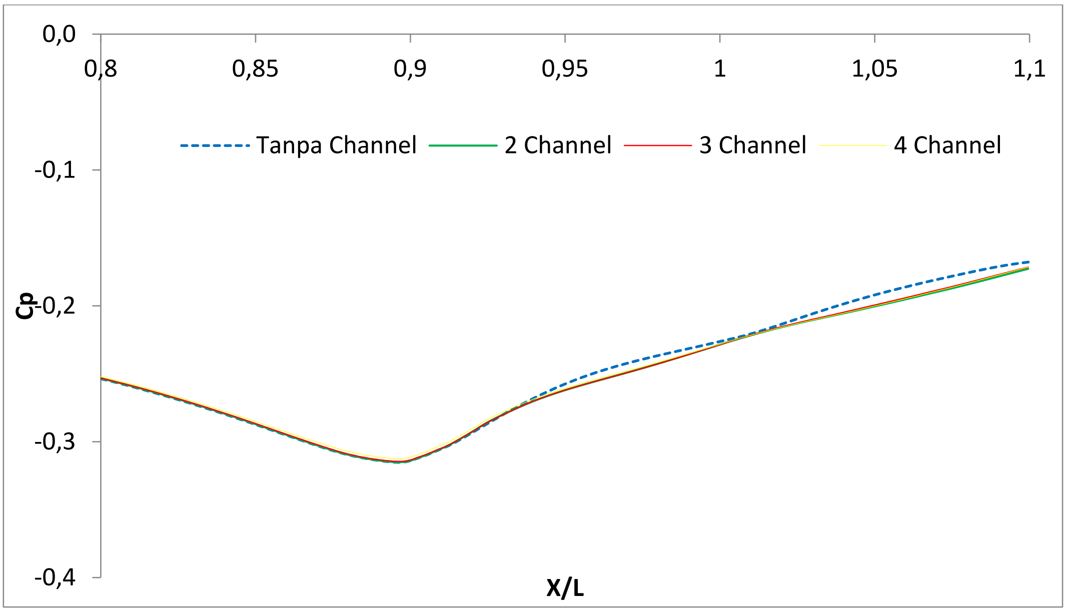
Pengamatan tentang pengaruh *multiple-channel diffuser* dengan *diffuser* tanpa *channel* dapat sedikit terlihat dengan *plotting* grafik *pressure coefficient,* akan tetapi untuk melihat perbedaan antara variasi 2, 3 dan 4 *channel* tidaklah mudah. Oleh karena itu diperlukan beberapa pengamatan tambahan seperti *pressure contour*, *pathline* dan lainnya.



Gambar 4.5 Ilustrasi skema pengukuran *pressure coefficient* pada *ground*.



Gambar 4.6 Grafik *pressure coefficient* pada *ground*.

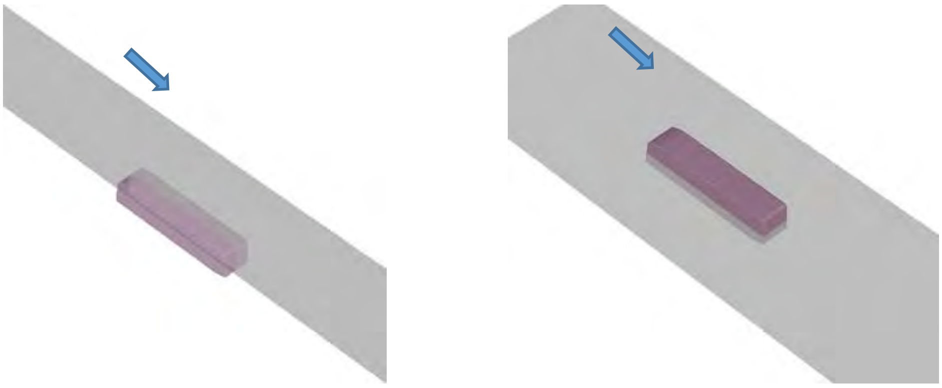


Gambar 4.7 Perbesaran grafik *pressure coefficient* pada *ground*.

Gambar 4.6 serta 4.7 memberikan tambahan informasi seputar pengaruh *multiple-channel* terhadap *pressure coefficient* yang dihasilkan. *Multiple-channel* dapat meningkatkan akselerasi aliran pada bagian bawah kendaraan. Akselerasi aliran ini akan menyebabkan penurunkan tekanan pada bagian bawah kendaraan dan akan memberi kontribusi pada *downforce* model bus.

4.1.2 *Velocity Pathline*

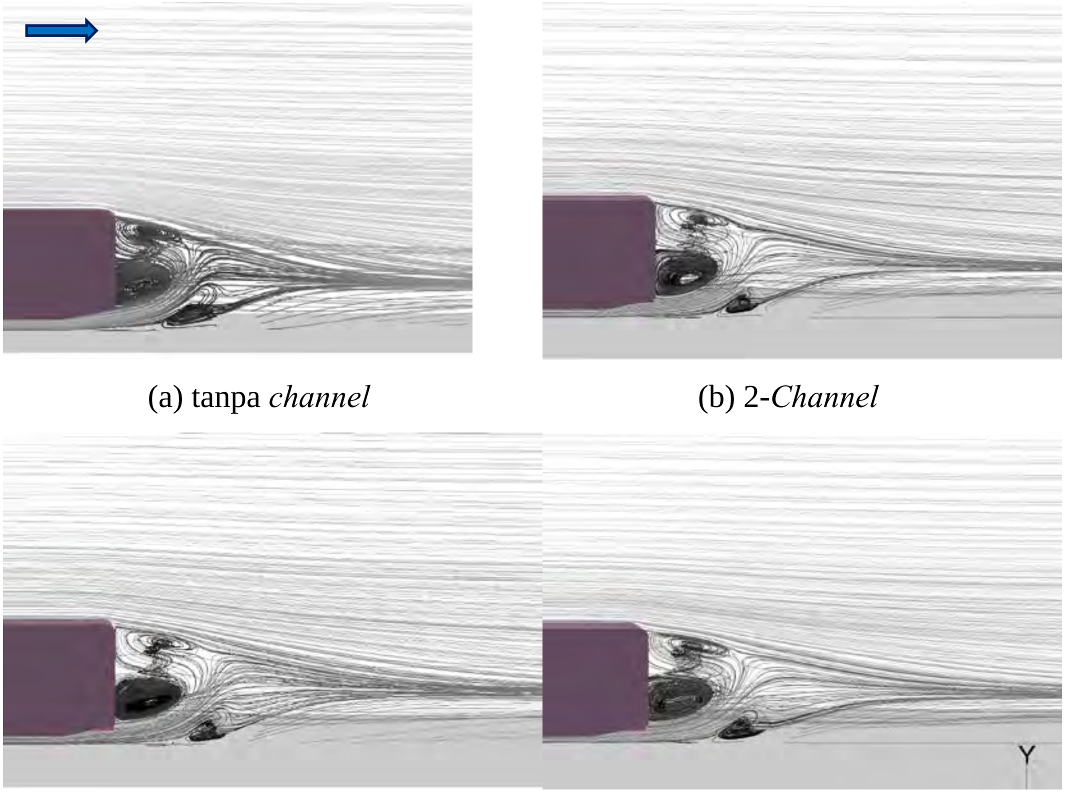
Velocity pathline ditunjukkan sebagai visualisasi untuk menunjukkan *recirculation zone* pada bodi belakang bus. Aliran turbulen sangat erat kaitannya dengan *wake,* separasi dan *recirculation zone*. Ketiga hal yang disebutkan sebelumnya sangat mempengaruhi performa aerodinamika suatu kendaraan.



(a) *midspan* bus (b) Y=0.5 *bus height*

Gambar 4.8 Ilustrasi skema pengukuran *pressure coefficient* pada *ground*.

Beberapa skema penyajian data *velocity pathline* ditunjukkan oleh gambar 4.9 dan 4.10. Gambar 4.9 merupakan *velocity pathline* pada bidang *midspan* domain sedangkan 4.10 pada bidang horizontal dengan Y= 0.5 *bus height*.



(a) tanpa *channel* (b) 2-*Channel*

(c) 3-*Channel* (d) 4-*Channel*

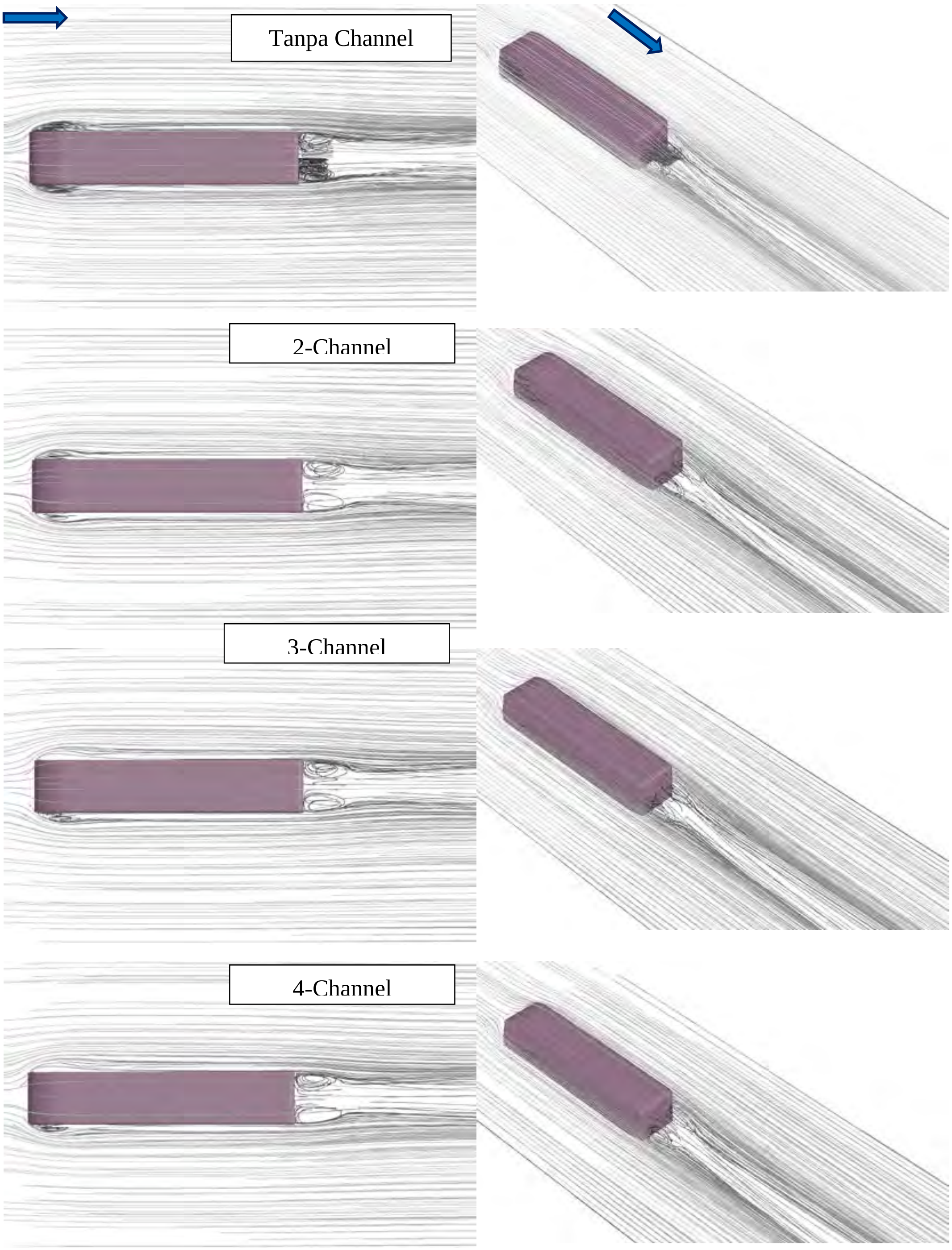
Gambar 4.9. *Velocity pathline* pada *midspan bus*

Gambar 4.9 memperlihatkan bahwa seiring penambahan *multiple-channel, vortex* yang terbentuk pada bagian belakang kendaraan cenderung semakin tereduksi. Fenomena terjadi akibat kehadiran *jetflow* pada bagian bawah kendaraan yang dapat memecah *vortex* dibagian belakang model bus.

Sedangkan gambar 4.10 menampilkan *pathline* pada bagian belakang bus dengan posisi pengukuran yang berbeda. Tren hasil yang muncul pada posisi pengukuran ini memiliki kesamaan dengan Gambar 4.9 yaitu *vortex* pada bagian belakang model bus tereduksi akibat pengaruh penambahan *multiple-channel.*

Masing-masing gambar menunjukkan bahwa terdapat pengurangan area yang memiliki *vortex*. Pada *vortex* terdapat aliran *backflow* yang merugikan bagi

performa aerodinamika. Berkurangnya *vortex* maka akan berimbas pada performa aerodinamkia model bus.

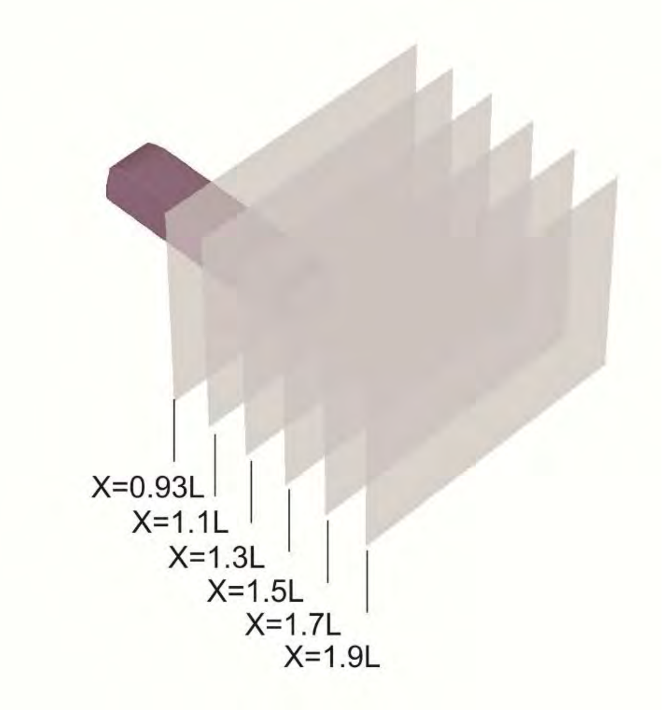


(a) *top view* (b) *isometric view*

Gambar 4.10. *Velocity pathline* pada *Y=0.5 bus height*

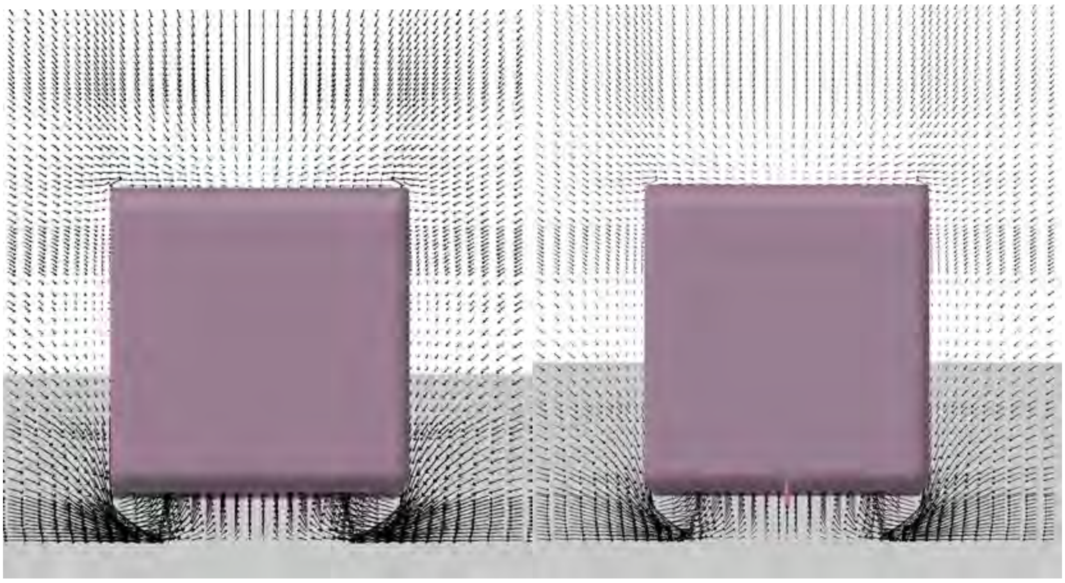
4.1.3 *Vector Velocity*

Wake pada model tiga dimensi jauh lebih rumit dibandingkan dengan model dua dimensi. *Wake* pada model tiga dimensi lebih sering didominasi oleh *streamwise vortices* daripada *transverse vortices*. *Vortices* ini berasal dari beberapa berbagai interaksi aliran pada bagian *upstream* dan sekitar model.

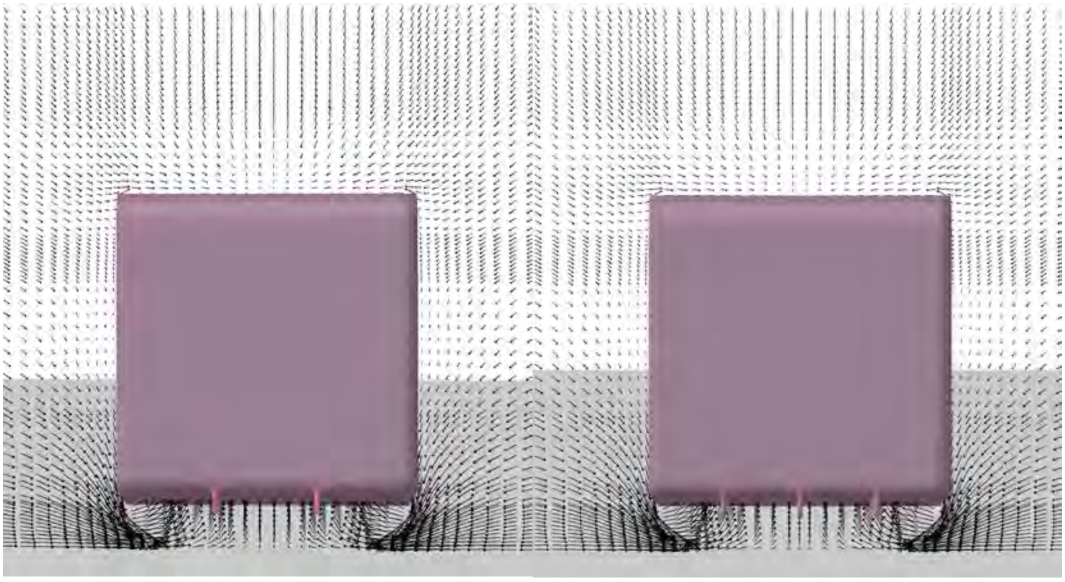


Gambar 4.11 Ilustrasi skema pengukuran *velocity profile* pada beberapa bidang dibelakang bodi model bus.

Gambar 4.11 menunjukkan beberapa bidang yang akan dilakukan pengukuran berupa *velocity profile*. 5 bidang pengukuran diantaranya X= 1,1L hingga 1.9 L dengan interval 0.2 L. Beberapa bidang ini akan menunjukkan perkembangan dan munculnya *vortices* dibelakang bodi kendaraan. *Vortices* mulai terbentuk dan akan semakin memudar dapat dilihat dari semakin jauhnya jarak pengukuran.



(a) tanpa *channel* (b) 2-*Channel*

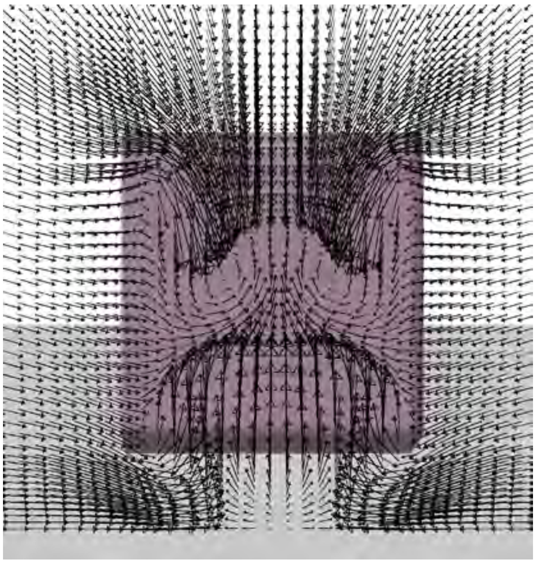


(c) 3-*Channel* (d) 4-*Channel*

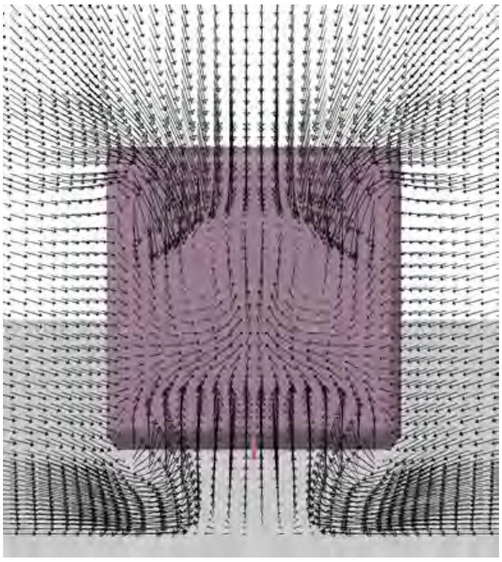
Gambar 4.12. *Velocity vector* pada *inlet diffuser*, x = 0.93L

Gambar 4.12 menunjukkan *velocity vector* pada bagian belakang bus. Data diambil pada bidang berjarak 0,93L (*inlet diffuser*). Aliran pada bagian samping bawah model bus terlihat memasuki bagian bawah kendaraan. Hal ini menandakan bahwa aliran dari samping memberikan kontribusi pada peningkatan *mass flow* di daerah *diffuser* dan akan memberikan pengaruh pada daerah *wake*.

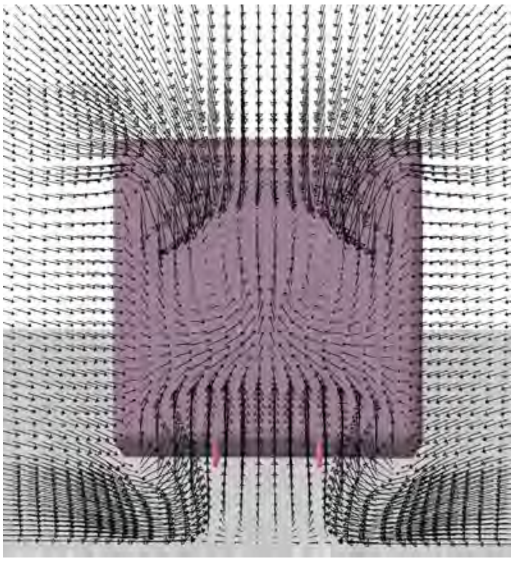
Sedangkan gambar 4.13 merupakan visualisasi *velocity vector* pada bidang berjarak 10% L dibelakang bus. Terlihat bahwa terdapat pasangan *contra-rotating vortices* yang memiliki efek seakan-akan mengarahkan aliran menuju pusat *wake*.



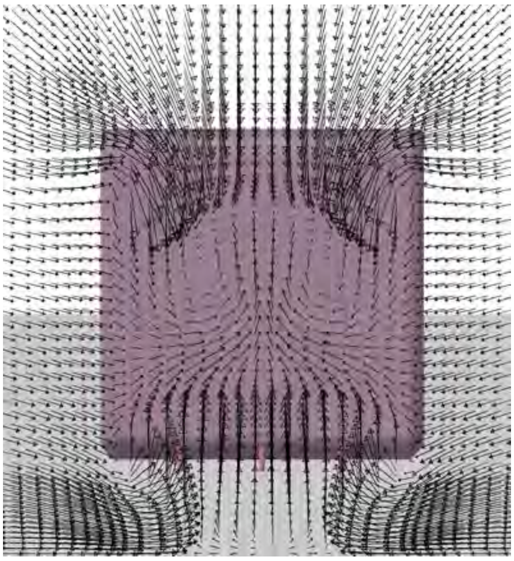
(a) tanpa *channel*



(b) 2-*Channel*

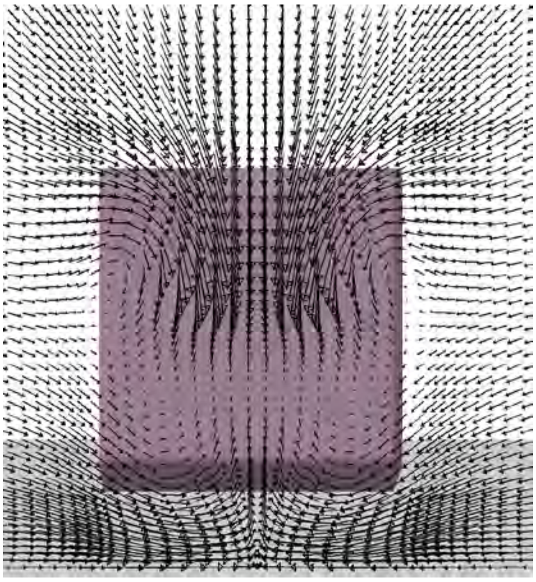


(c) 3-*Channel*

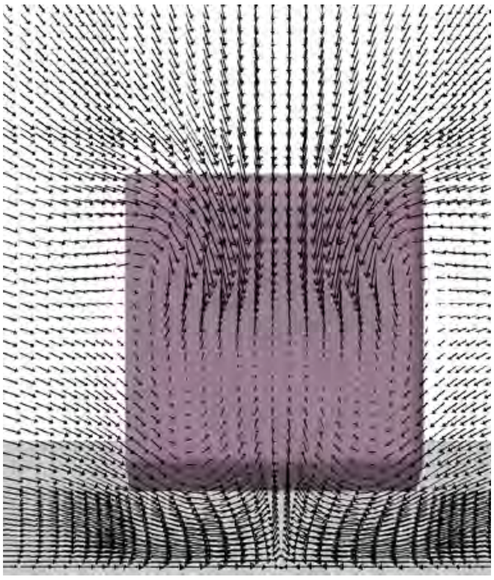


(d) 4-*Channel*

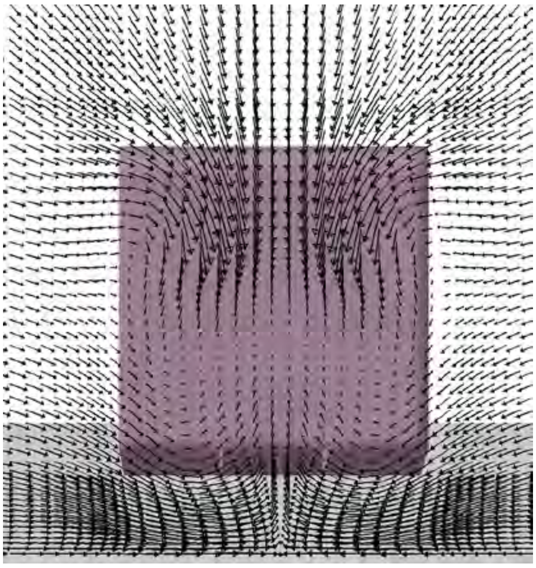
Gambar 4.13. *Velocity vector* pada bidang berjarak x = 1.1L



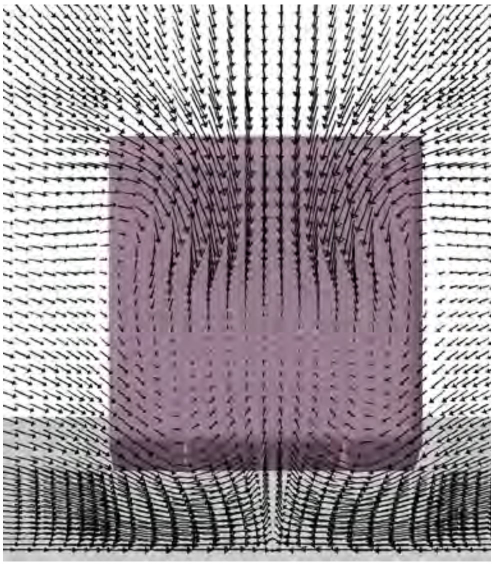
(a) tanpa *channel*



(b) 2-*Channel*



(c) 3-*Channel*

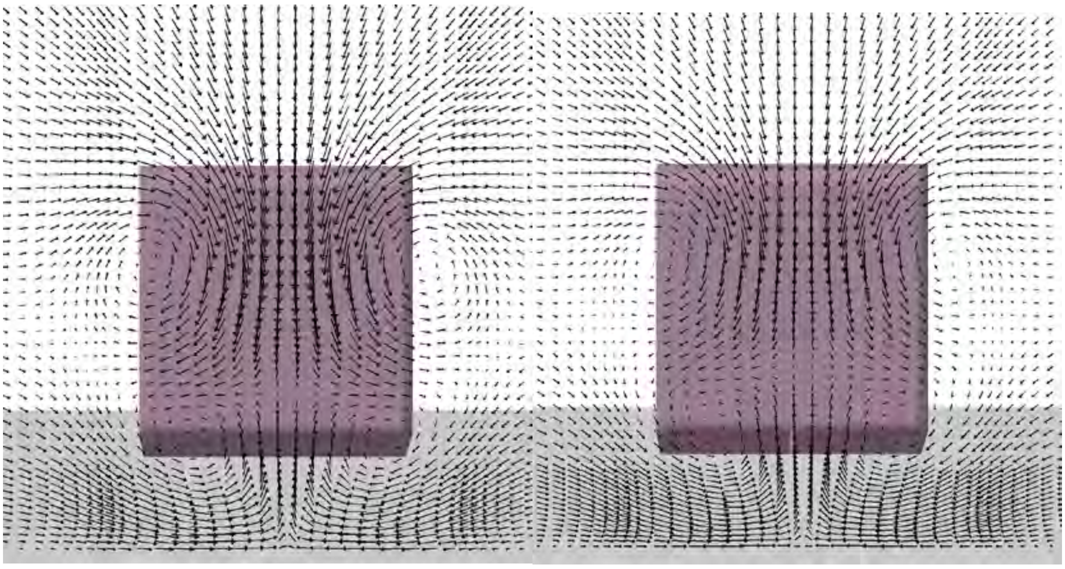


(d) 4-*Channel*

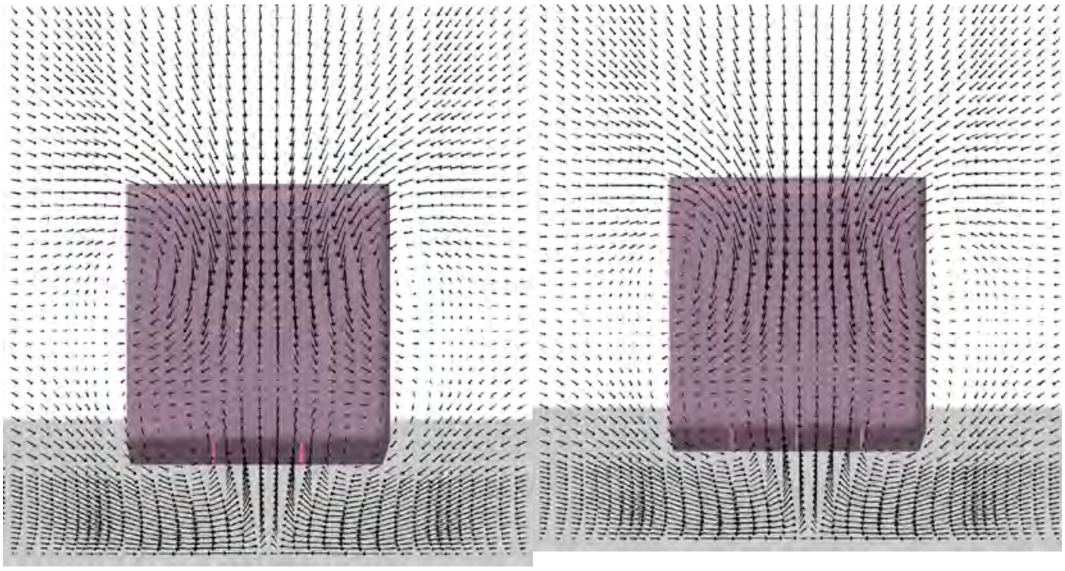
Gambar 4.14. *Velocity vector* pada bidang berjarak x = 1.3L

Gambar 4.14 mengindikasikan perkembangan *vortices* yang berpasangan mulai bergeser. Pergeseran *vortices* menunjukkan adanya pengaruh dari aliran bawah kendaraan dimana aliran bawah kendaraan juga mulai mebentuk pusaran. *Vortices* ini sangat berperan dalam memperbaiki performa aerodinamika kendaraan. *Vortices* ini berperan dalam memecah *wake* pada bagian belakang model bus.

Secara keseluruhan bentuk *velocity profile* antara model bus tanpa dan dengan *multiple-channel* tidak menunjukkan hasil yang berbeda.



(a) tanpa *channel* (b) 2-*Channel*

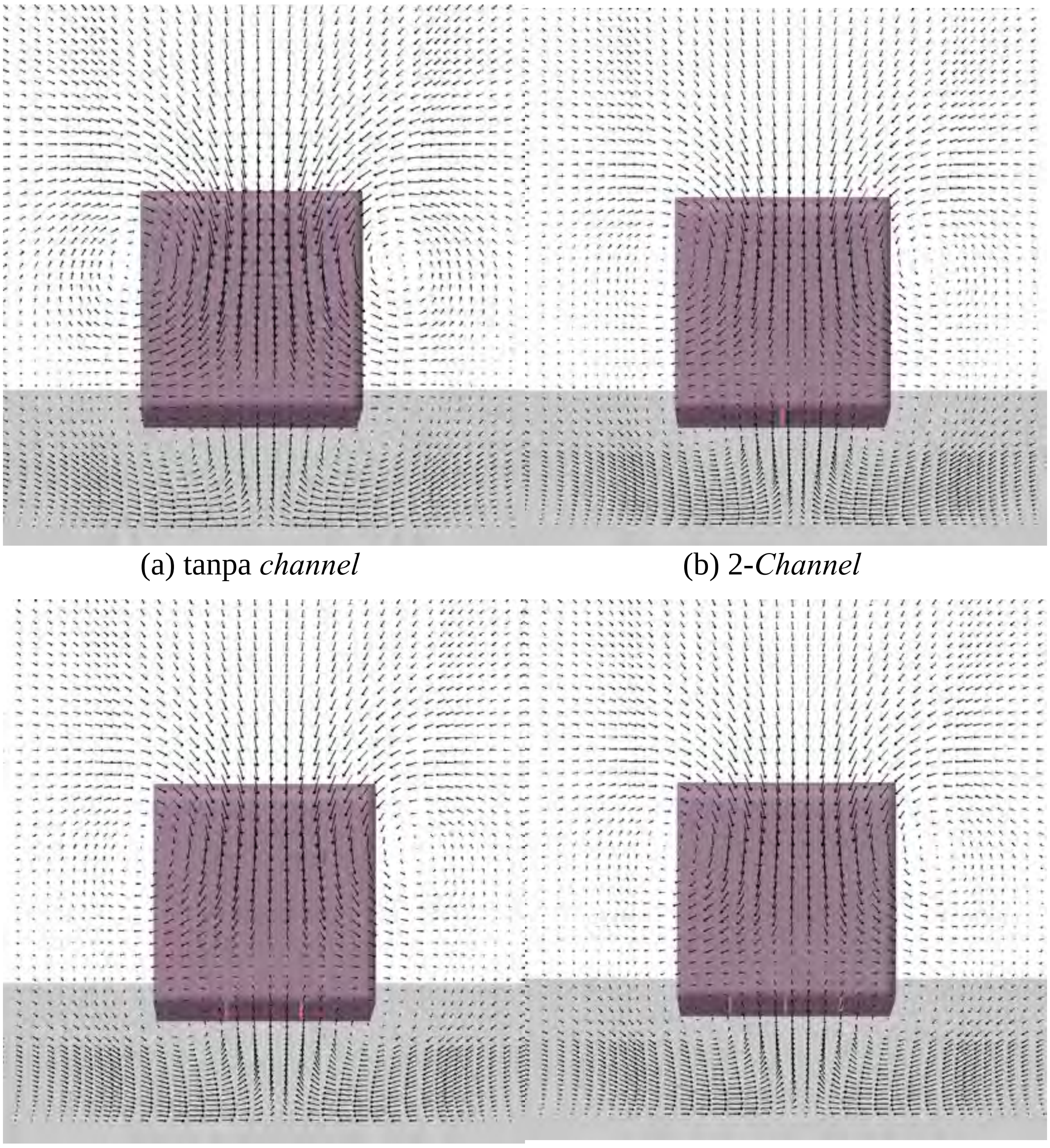


(c) 3-*Channel* (d) 4-*Channel*

Gambar 4.15. *Velocity vector* pada bidang berjarak x = 1.50L

Gambar 4.15 menunjukkan kemunculan *rotating vortices* pada bagian atas dan bawah kendaraan. *Vortices* pada bagian bawah kendaraan disebabkan oleh interaksi viskos antara bodi bus dengan *ground-plane boundary layer. Vortices* pada bagian atas kendaraan jauh lebih kuat dibandingkan *vortices* pada bagian bawah [14]. Terdapat aliran *upwash* yang kuat diantara *counter rotating vortices* dan hal ini menyebabkan model bus mengalami *lift* [15].

Gambar 4.15 mengindikasikan bahwa eksistensi *vortices* pada bagian ujung atas model bus masih ada. Disamping itu, terlihat kemunculan *vortices* yang berpasangan pula pada bagian bawah kendaraan. Namun kekuatan *vortices* ini tak sekuat *vortices* pada bagian atas.



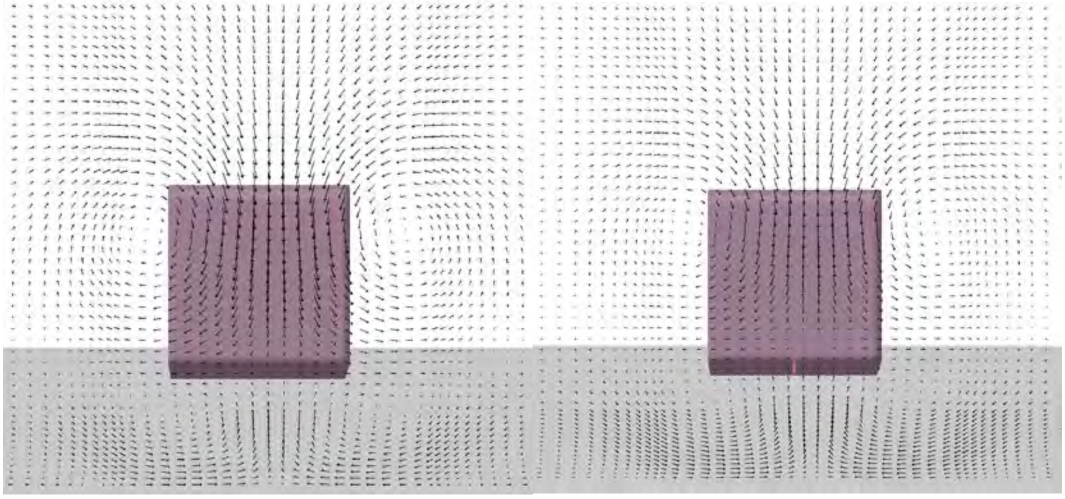
(a) tanpa *channel* (b) 2-*Channel*

(c) 3-*Channel* (d) 4-*Channel*

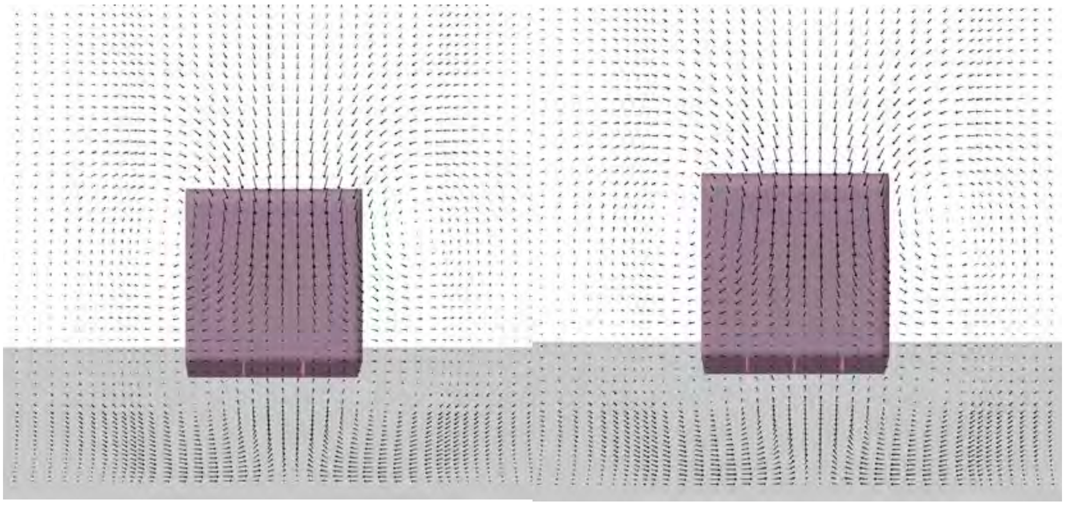
Gambar 4.16. *Velocity vector* pada bidang berjarak x = 1.7L

Gambar 4.16 menggambarkan lebih jauh bahwa sepasangan *vortices* dibagian bawah kendaraan masih terus eksis hingga kebelakang model bus. Namun dalam intensitas yang terus menurun. Sedangkan sepasang *vortices* pada bagian atas

kendaraan masih lebih kuat dibandingkan *vortices* bawah sehingga masih sangat terlihat.



(a) tanpa *channel* (b) 2-*Channel*



(c) 3-*Channel* (d) 4-*Channel*

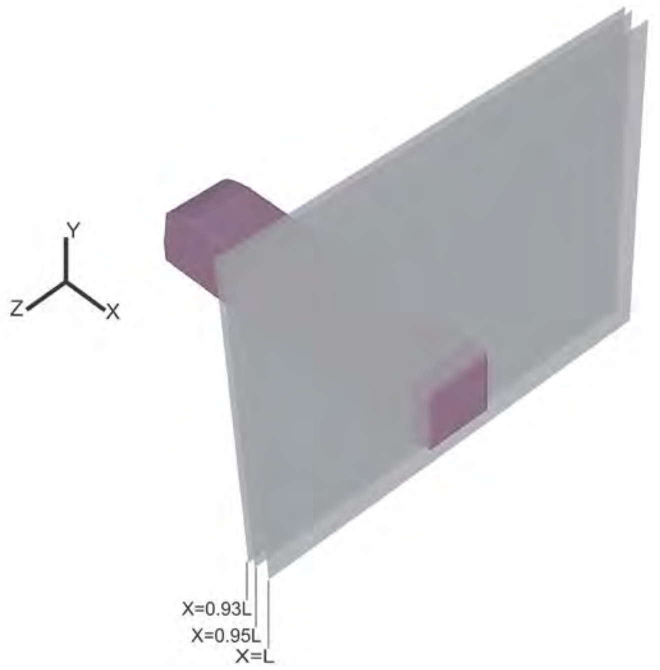
Gambar 4.17. *Velocity vector* pada bidang berjarak x = 1.9L

Sedangkan gambar 4.17 menunjukkan bahwa *vortices* pada bagian bawah kendaraan telah hilang serta pada bagian atas kendaraan mulai berkurang intensitasnya.

Pengamatan tentang pengaruh *multiple-channel diffuser* sulit diamati dengan menggunakan data *velocity vector* pada beberapa daerah dibelakang bodi model bus. *Velocity vector* yang muncul memiliki kemiripan tren antara satu dengan yang lain. Oleh karena itu, pengamatan detil berupa tekanan pada daerah potongan disekitar *diffuser* serta *velocity profile* sangat diperlukan.

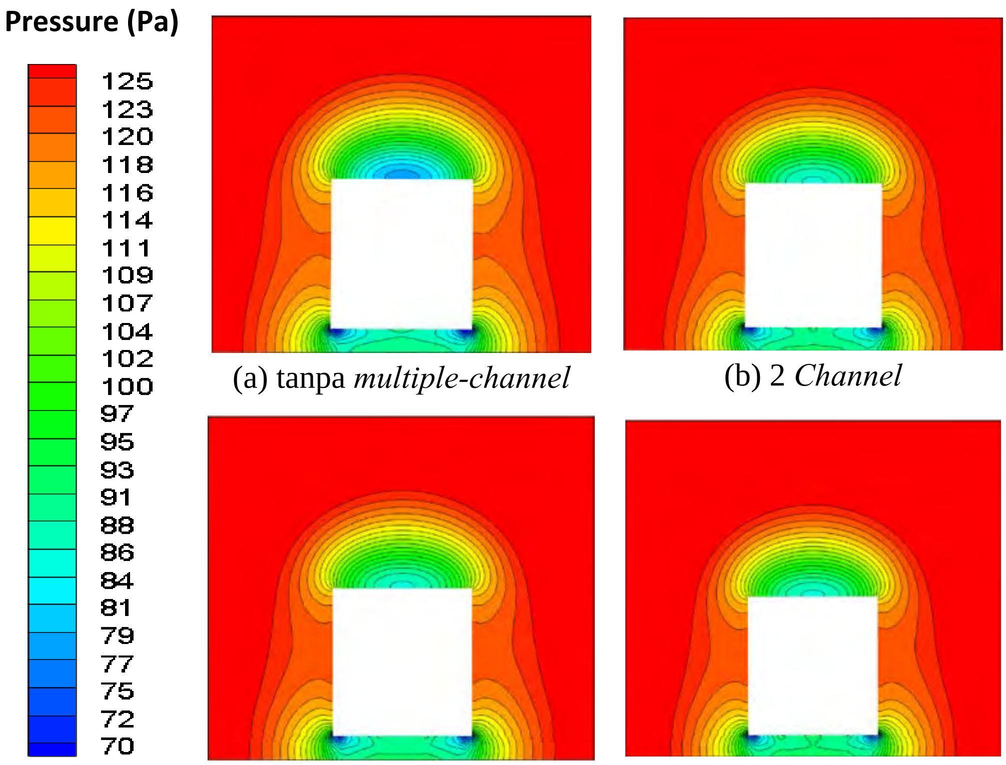
4.1.4 *Pressure Contour*

Penambahan *multiple-channel diffusers* tentunya sangat mempengaruhi aliran disekitar *inlet* hingga *outlet diffuser*. Oleh karena itu pengamatan berupa *pressure contour* akan difokuskan pada daerah tersebut. Bidang dibuat pada X= 0.93L, 0,95L serta L.



Gambar 4.18 Ilustrasi skema pengukuran *tekanan* pada daerah *multiple-channel*.

Gambar 4.18 merupakan skema pengukuran *pressure contour* yang difokuskan pada bagian *multiple-channel diffuser.* Sedangkan Gambar 4.19 menunjukkan *pressure contour* pada bagian *diffuser inlet* (X=0,93L). Pada daerah *inlet* ini terdapat penambahan luas area yang bertekanan rendah. Penambahan luas area bertekanan rendah sangat bervariasi tergantung dari jumlah *channel* yang diterapkan. Luas area bertekanan rendah yang semakin meluas menunjukkan bahwa terjadi peningkatan *diffuser pumping* akibat pengaruh dari *multiple-channel.*



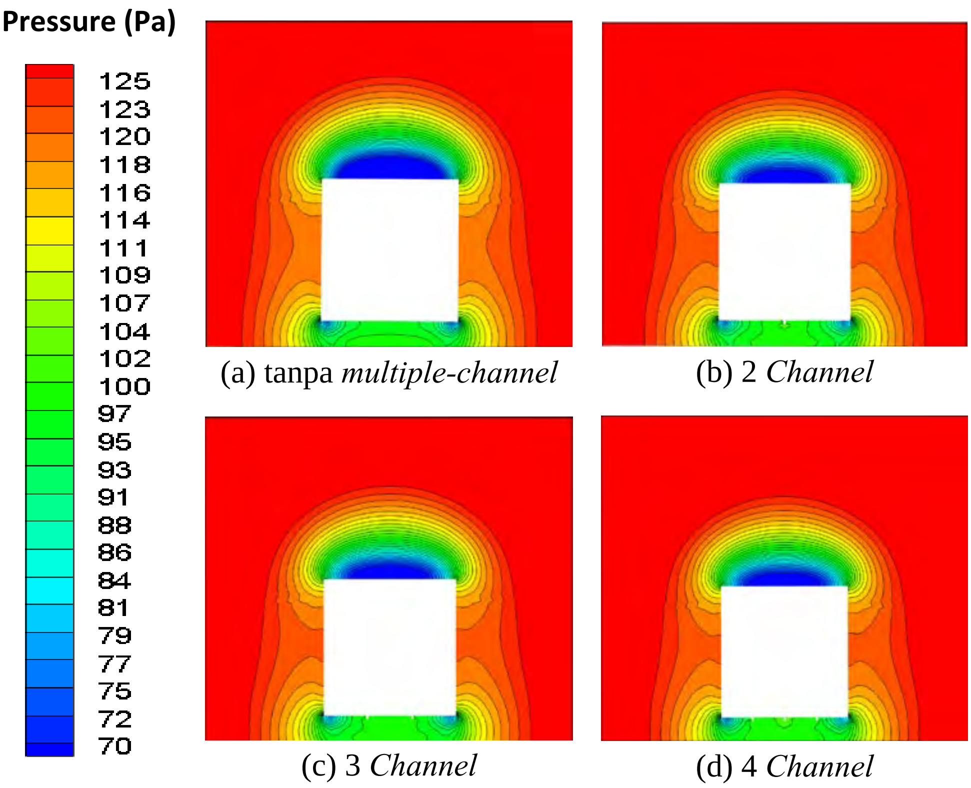
(a) tanpa *multiple-channel* (b) 2 *Channel*

(c) 3 *Channel* (d) 4 *Channel*

Gambar 4.19. *Pressure contour* pada X= 0,93L (*diffuser inlet*)

Gambar 4.20 merupakan informasi tambahan terkait *pressure contour.* Pengukuran pada bagian antara *inlet* dan *outlet* (X= 0,95L) serta pada bagian *diffuser outlet.* Gambar 4.20 serta 4.21 memberikan informasi terkait pengaruh *multiple-channel diffusers* terhadap *pressure recovery* dibelakang bodi model bus.

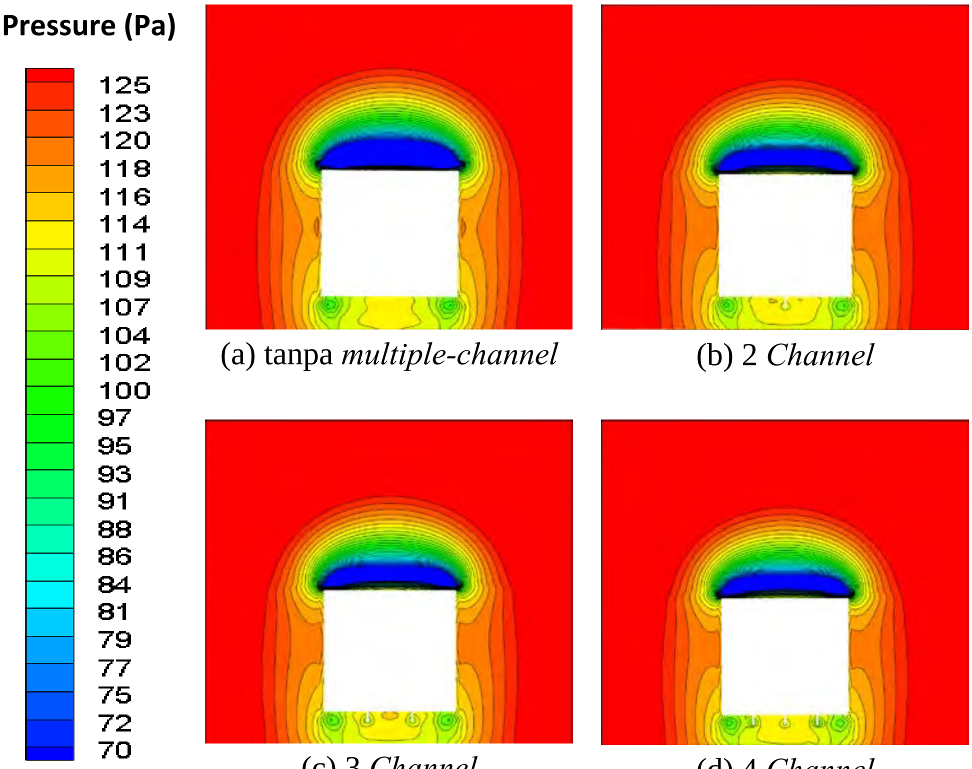
Berdasarkan Gambar 4.20 serta Gambar 4.21 terlihat terdapat peningkatan luasan area bertekanan lebih tinggi pada bagian bawah bus. *Channel* 2,3 dan 4 masing-masing menunjukkan contour yang tidak sama. Namun jika dibandingkan dengan tanpa *channel* dapat cukup dibedakan. Berangsur-angsur tekanan meningkat dari jarak X= 0,95L hingga ke *diffuser outlet* (X =L). Peningkatan tekanan ini dapat berkontribusi pada aerodinamika kendaraan khususnya *drag.* Pada akhirnya, *Multiple-channel* menunjukkan pressure recovery yang lebih baik dibandingkan dengan *diffuser* tanpa *channel.*



(a) tanpa *multiple-channel* (b) 2 *Channel*

(c) 3 *Channel* (d) 4 *Channel*

Gambar 4.20. *Pressure contour* pada X= 0,95L



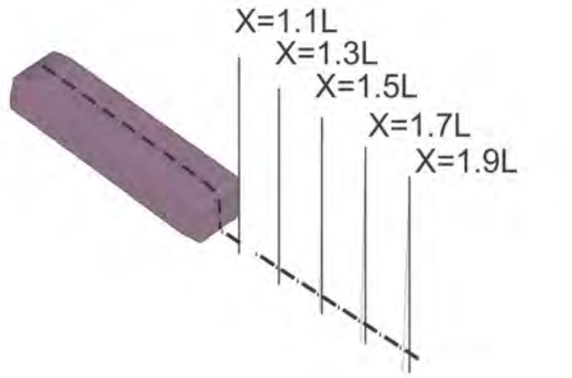
(a) tanpa *multiple-channel* (b) 2 *Channel*

(c) 3 *Channel* (d) 4 *Channel*

Gambar 4.21. *Pressure contour* pada X= L (*diffuser outlet*)

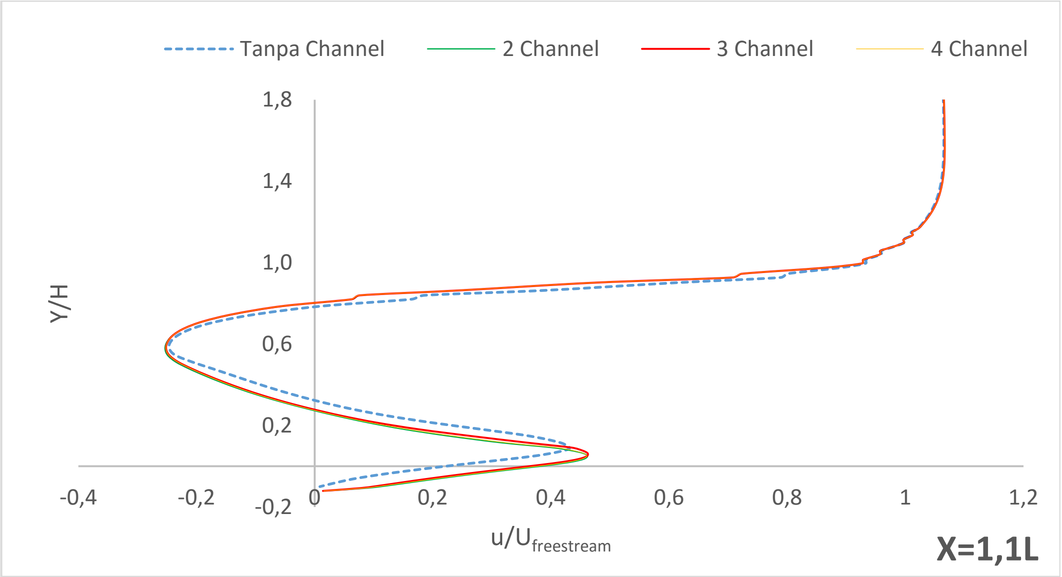
4.1.5 *Velocity Profile*

Pengamatan berupa *velocity profile* dapat memberikan informasi berupa terkait karakteristik aliran. *Velocity profile* dapat memberikan informasi terkait eksistensi *reversed flow* pada suatu kasus aliran fluida. *Reversed flow* dalam aliran fluida seringkali dihindari karena seringkali memberikan kerugian.



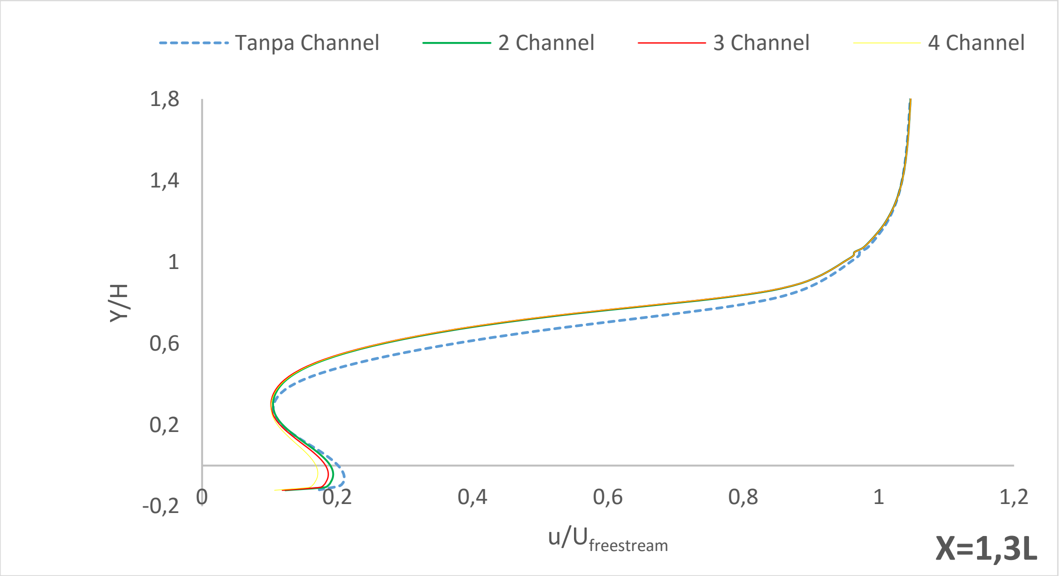
Gambar 4.22 Ilustrasi skema pengukuran *velocity profile* pada bidang simetri vertikal z = 0

Gambar 4.22 merupakan skema yang menunjukkan beberapa titik pengukuran dengan variasi jarak antara X= 1.1 - 1.9 L. Pengukuran ini akan menunjukkan perkembangan profil kecepatan dari tiap-tiap titik dan jarak pengukuran.



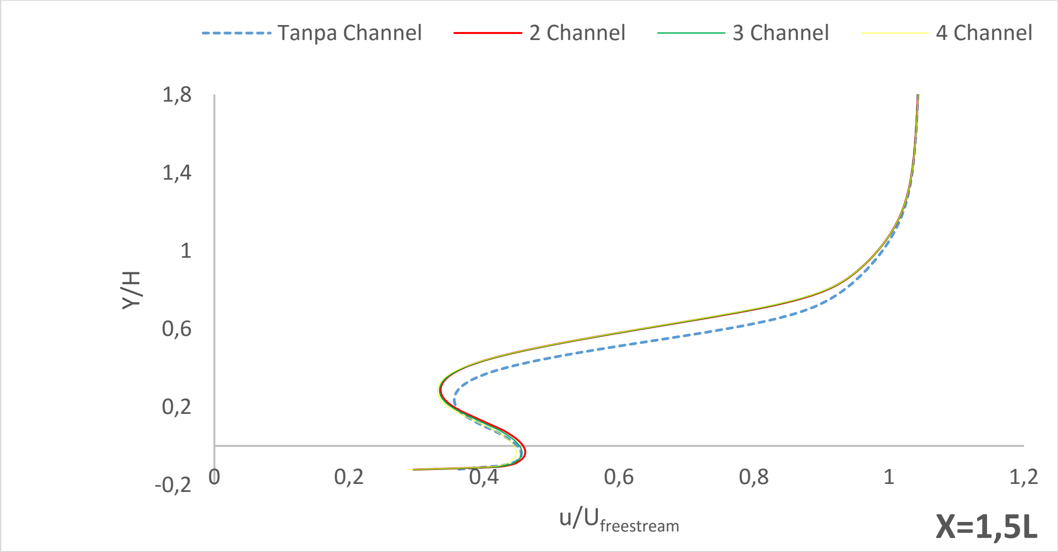
Gambar 4.23. *Velocity profile* pada bidang simetri vertikal z = 0 di dalam daerah *wake.* (x = 1,1L)

Gambar 4.23 menunjukkan profil kecepatan pada daerah *downstream* model bus pada bidang berjarak 1.1 L. Gambar 4.23 merupakan normalisasi kecepatan arah x terhadap kecepatan *freestream* ($U_{freestream}$). $u/U_{freestream}$ pada bagian bawah kendaraan menunjukkan nilai positif. Hal ini disebabkan oleh *jetflow* pada bagian antara permukaan bawah kendaraan dengan *ground.* Kecepatan maksimum bernilai positif pada daerah ini, bernilai sekitar 0.43 kali kecepatan *freestream*. Aliran bernilai negatif antara Y/H = 0,35 dan Y/H = 0,75 menunjukkan *backflow* dan daerah *wake* pada bagian *downstream* model bus. *Reversed velocity* maksimum pada *recirculation zone* menunjukkan besaran 0.25 kali dari kecepatan *freestream.*



Gambar 4.24. *Velocity profile* pada bidang simetri vertikal z = 0 di dalam daerah *wake.* (x = 1,3L)

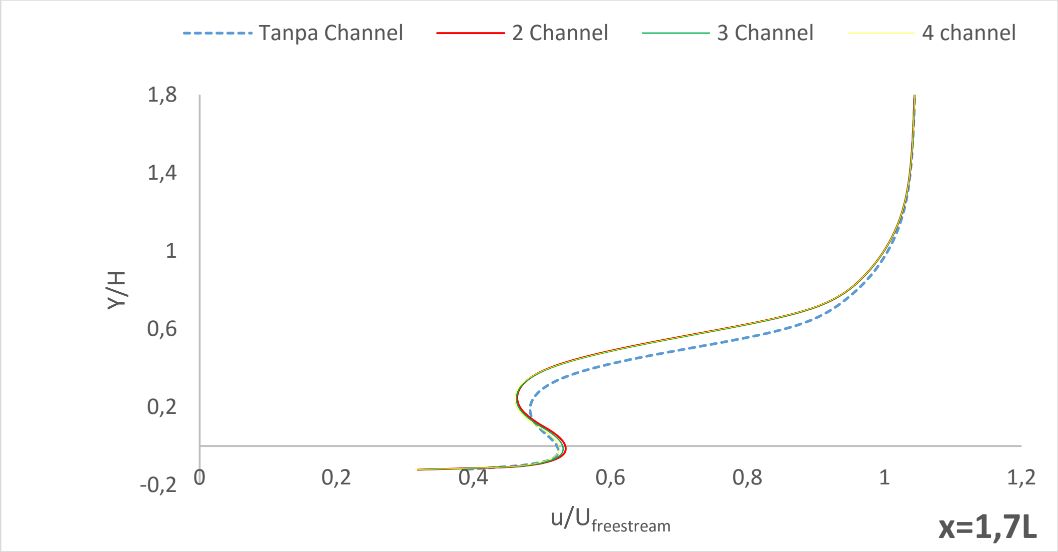
Gambar 4.24 menunjukkan perkembangan *velocity profile* pada jarak 0,3L dibelakang bodi bus. Terlihat pada gambar 4.24 tidak ada perubahan yang signifikan pada kecepatan arah x. grafik yang terbentuk saling berhimpitan antara *multiple-channel* dengan tanpa *channel*.



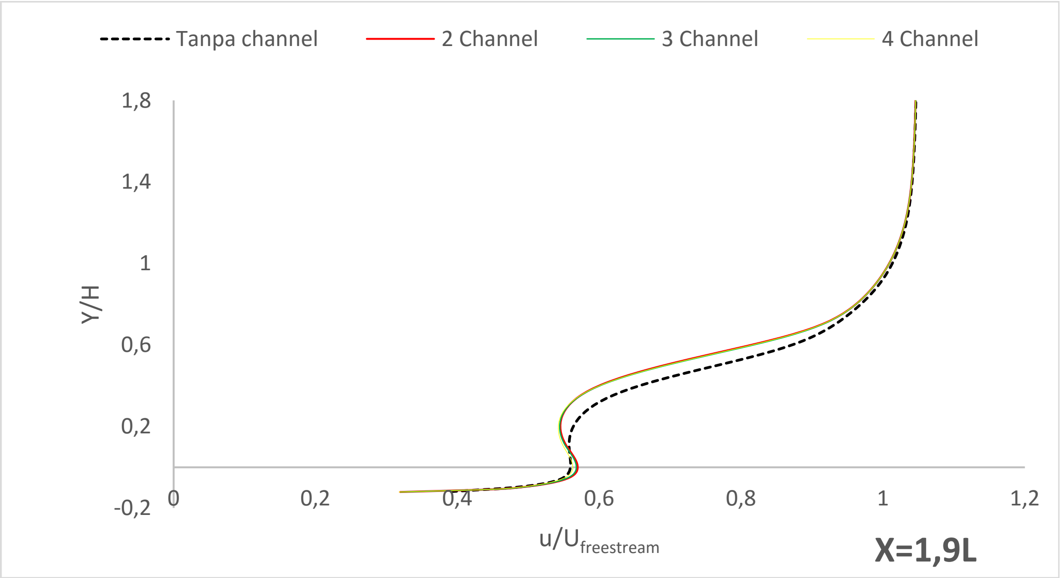
Gambar 4.25. *Velocity profile* pada bidang simetri vertikal z = 0 di dalam daerah *wake.* (x = 1,5L)

Gambar 4.25 merupakan perkembangan *velocity profile* kecepatan arah x pada jarak 50%L dibelakang bodi bus. Tren yang muncul pada grafik ini kurang lebih mirip dengan Gambar 4.24 Grafik yang terbentuk saling berhimpitan, baik tanpa maupun dengan *multiple-channel.*

Sedangkan Gambar 4.26 hingga 4.27 merupakan *velocity profile* pada jarak 70% dan 90% di belakang bodi bus. Kedua gambar tersebut menunjukkan tren yang hampir identik.

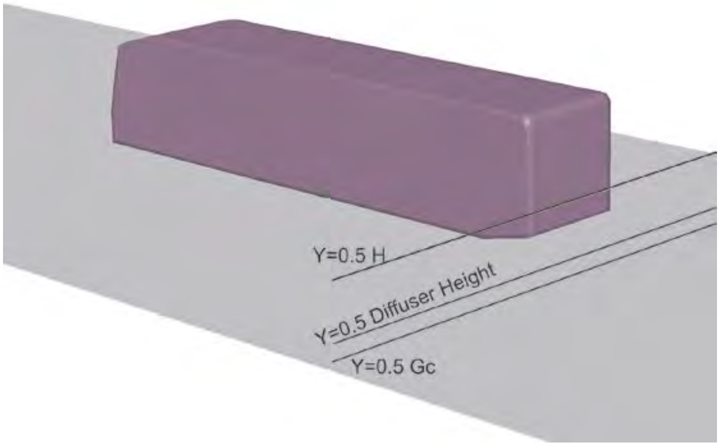


Gambar 4.26. *Velocity profile* pada bidang simetri vertikal z = 0 di dalam daerah *wake.* (x = 1,7L)

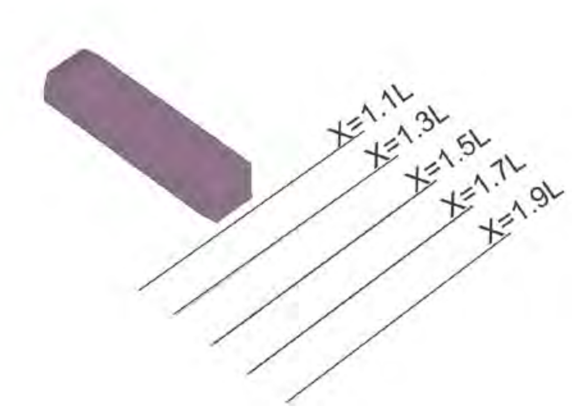


Gambar 4.27. *Velocity profile* pada bidang simetri vertikal z = 0 di dalam daerah *wake.* (X = 1,9L)

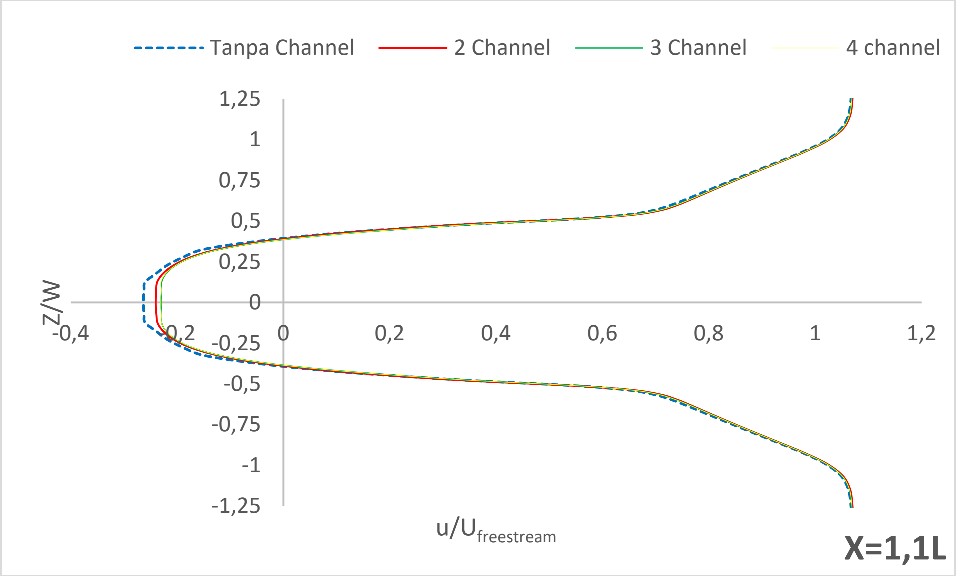
Pengamatan terkait *velocity profile* tidak hanya dilakukan pada bidang vertical melainkan juga horizontal. Gambar 4.29 menunjukkan variasi jarak pengukuran yaitu X= 1.l – 1.9L dengan interval 0.2L. sedangkan beberapa variasi ketinggian lokasi pengukuran juga dilakukan untuk mengamati secara detil pengaruh *multiple-channel diffusers.* Gambar 4.28 menunjukkan beberapa variasi ketinggian lokasi pengukuran.



Gambar 4.28 Ilustrasi skema pengukuran. beberapa variasi ketinggian titik pengukuran

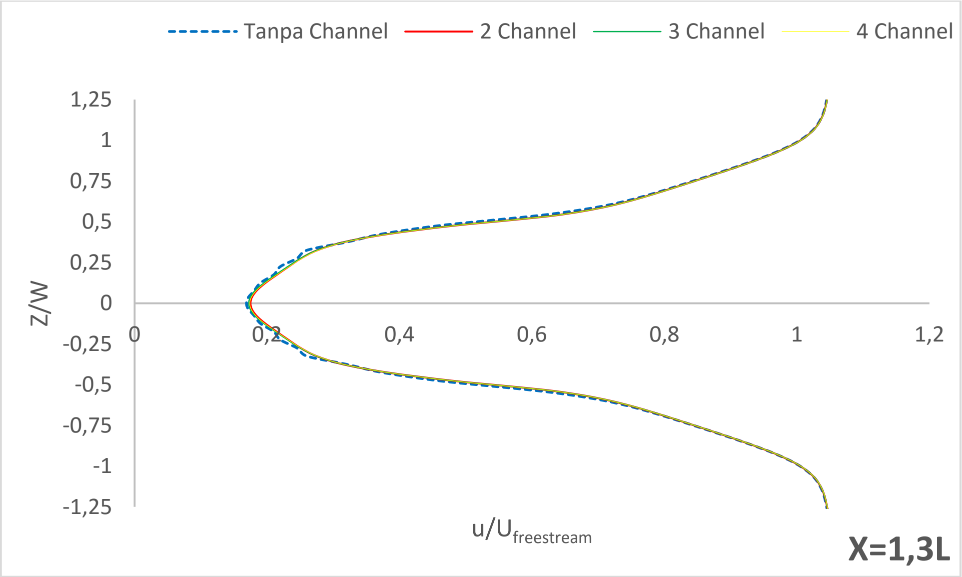


Gambar 4.29 Ilustrasi skema pengukuran *velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/H = 0,5

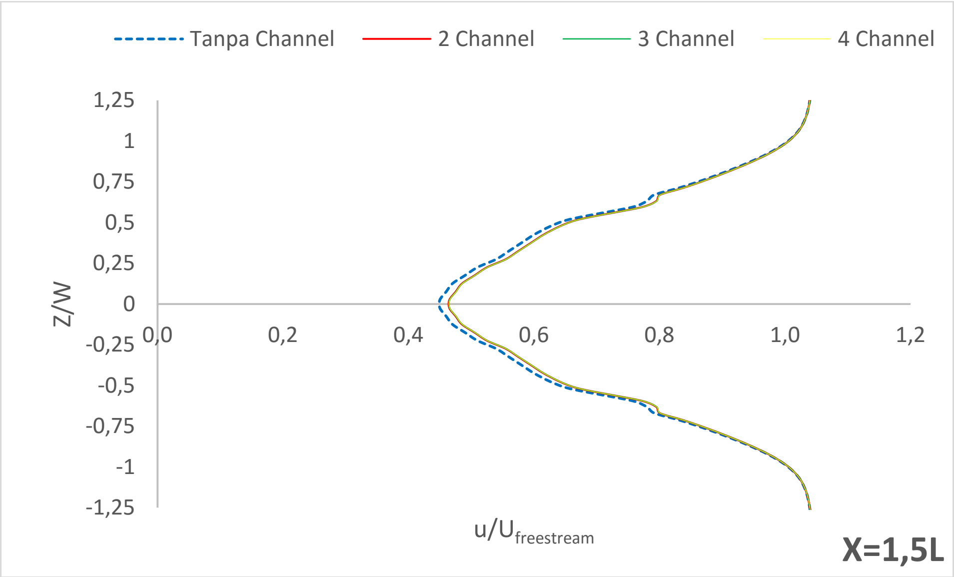


Gambar 4.30. *Velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/H = 0,5 di dalam daerah *wake.* (x = 1,1L)

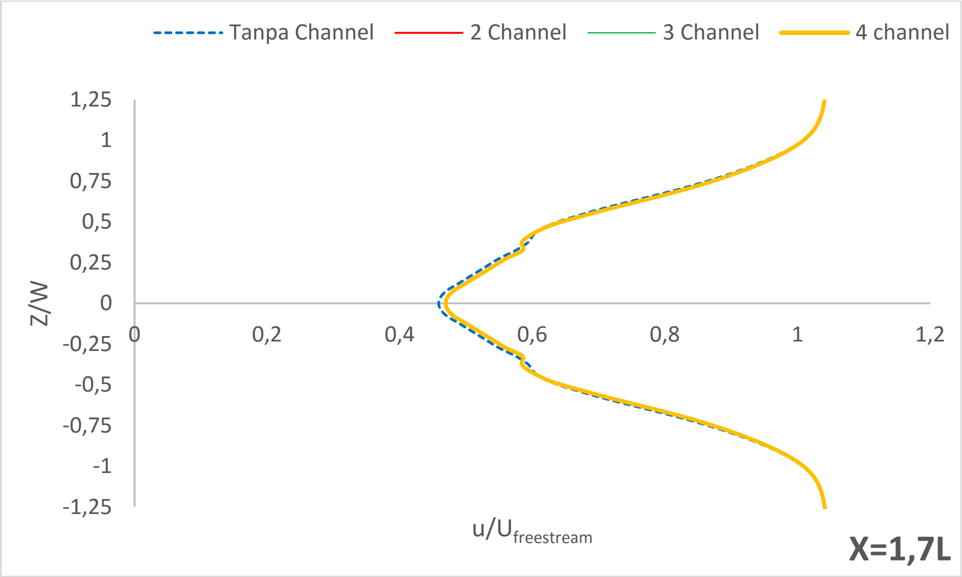
Gambar 4.30 merupakan *velocity profile* pada garis horizontal bidang xz berjarak 1.1L dari depan model bus. Gambar 4.30 merupakan *velocity profile* arah x. Karaterisitik aliran terlihat simetris dengan pusat model bus. *Multiple-channel diffuser* memunculkan *reversed flow* yang sedikit lebih kecil dibandingkan dengan *diffuser* tanpa *channel*.



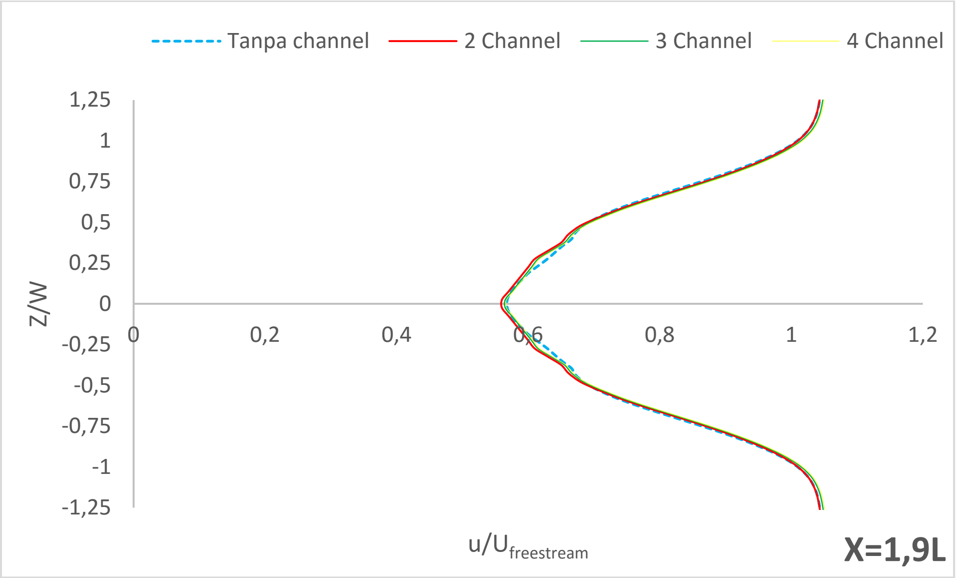
Gambar 4.31. *Velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/H = 0,5 di dalam daerah *wake.* (x = 1,3L)



Gambar 4.32. *Velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/H = 0,5 di dalam daerah *wake.* (x = 1,5L)



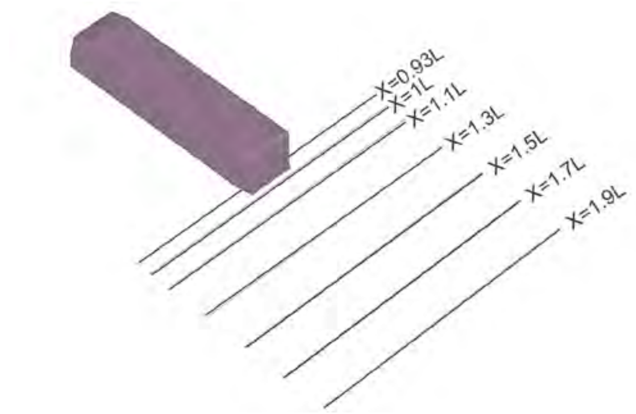
Gambar 4.33. *Velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/H = 0,5 di dalam daerah *wake.* (x = 1,7L)



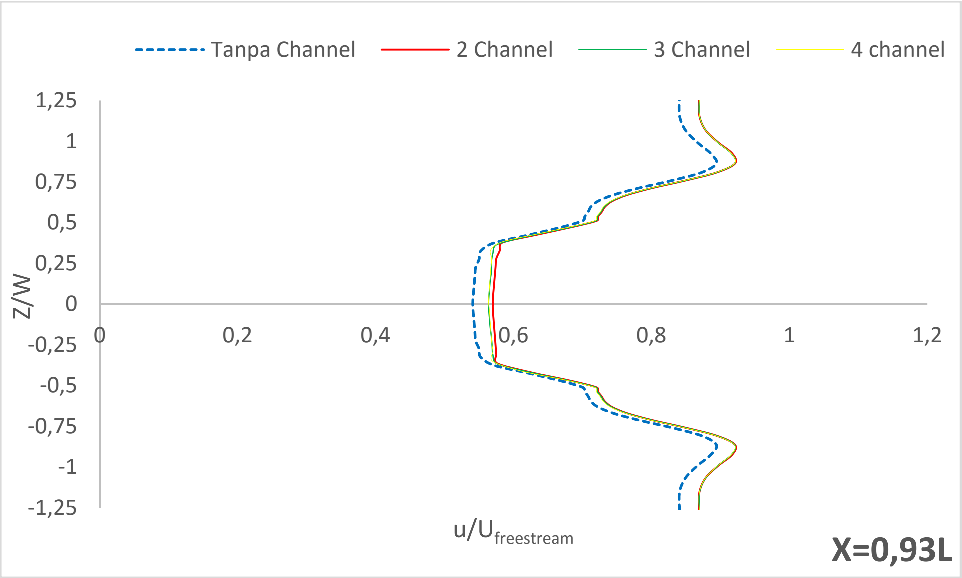
Gambar 4.34. *Velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/H = 0,5 di dalam daerah *wake.* (x = 1,9L)

Gambar 4.31 hingga 4.34 masing-masing adalah *velocity profile* pada X=1,3L hingga 1,9L. tren yang muncul pada Gambar 4.31 hingga 4.34 memiliki kemiripan sehingga bentuk grafik cenderung berhimpitan. Berdasarkan gambar-gambar tersebut terlihat bahwa *velocity profile* akan semakin meningkat seiring semakin jauhnya bidang pengukuran dibelakang model bus.

Pengamatan lainnya dilakukan pada daerah antara *diffuser* dengan *ground.* Hal ini berguna untuk mengamati pengaruh *channel* terhadap karakterisitik aliran bawah model bus. Gambar 4.35 menunjukkan skema pengukuran dengan 7 variasi jarak.

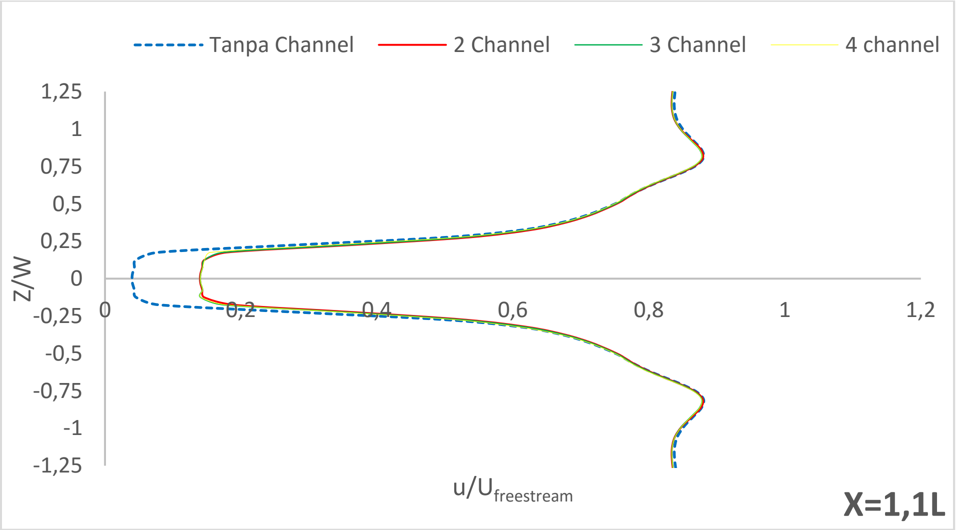


Gambar 4.35 Ilustrasi skema pengukuran *velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/Gc = 0,5



Gambar 4.36. *Velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/Gc = 0,5 di dalam daerah *wake.* (x = 0,93L)

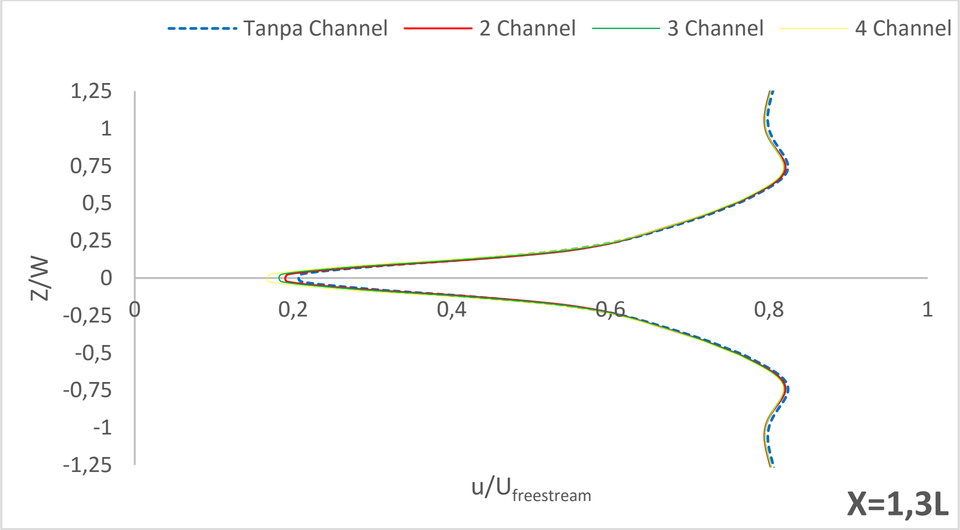
Gambar 4.36 menunjukkan *velocity profile* pada bagian bawah model bus. Jarak 0,93 L merupakan sisi *inlet diffuser*. Terdapat perbedaan pada data *diffuser* tanpa dan dengan *channel*. Terdapat peningkatan kecepatan dengan menggunakan *channel*. Hal ini menunjukkan efek seperti pada *nozzle.* Pengurangan luas area meningkatkan kecepatan fluida.



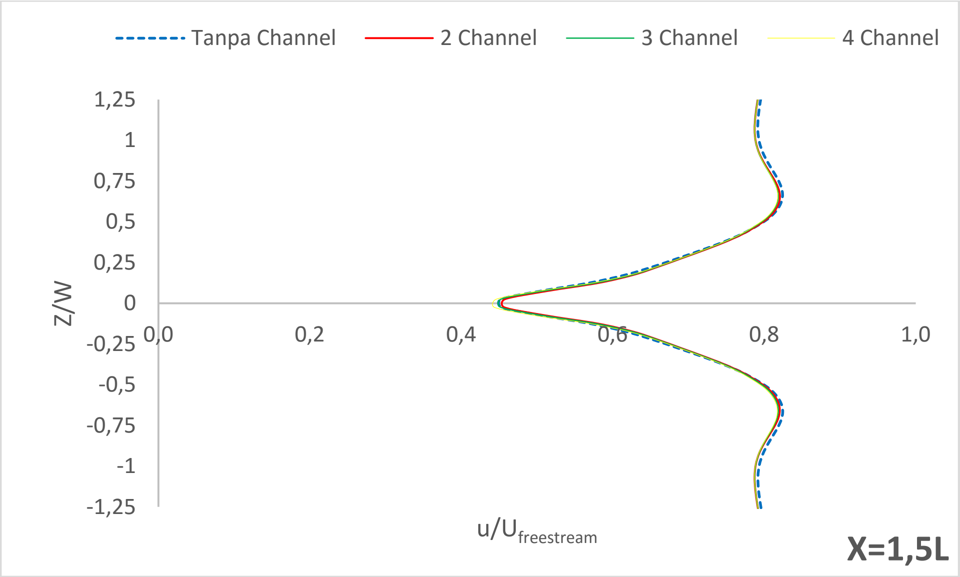
Gambar 4.37. *Velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/Gc = 0,5 di dalam daerah *wake.* (x = 1,1L)

Gambar 4.37 memberikan gambaran detil yang memperkuat pernyataan bahwa *channel* memberikan peningkatan kecepatan yang akan berkontribusi untuk memecah *wake* di belakang bodi bus.

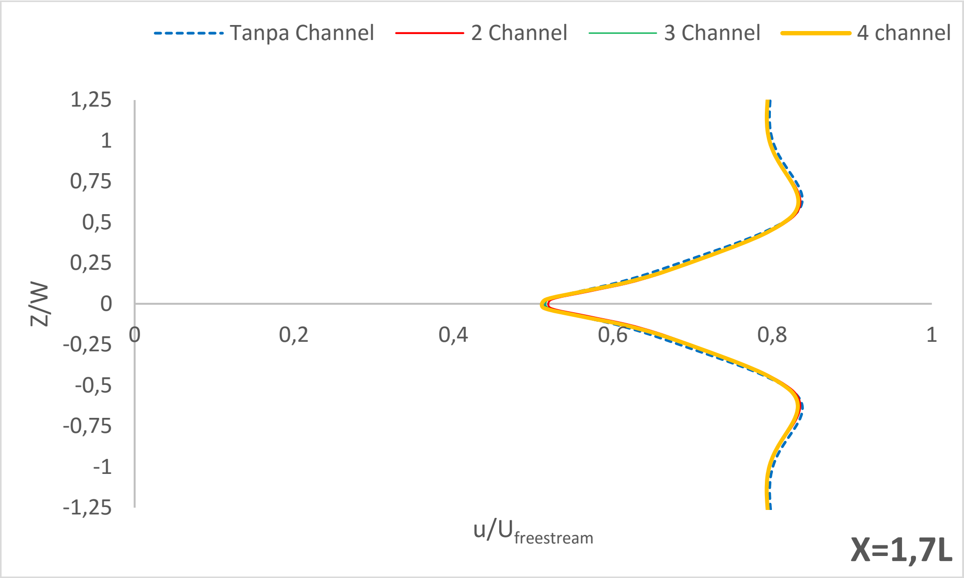
Terlihat pada Gambar 4.38 hingga 4.41, tren berbeda terjadi pada X=1,3-1,9L dimana grafik saling berhimpitan. Hal ini menandakan bahwa *velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/Gc = 0,5 diffuser tanpa channel dengan *multiple-channel* tidak memberi perbedaan pada daerah yang sudah jauh dibelakang bus.



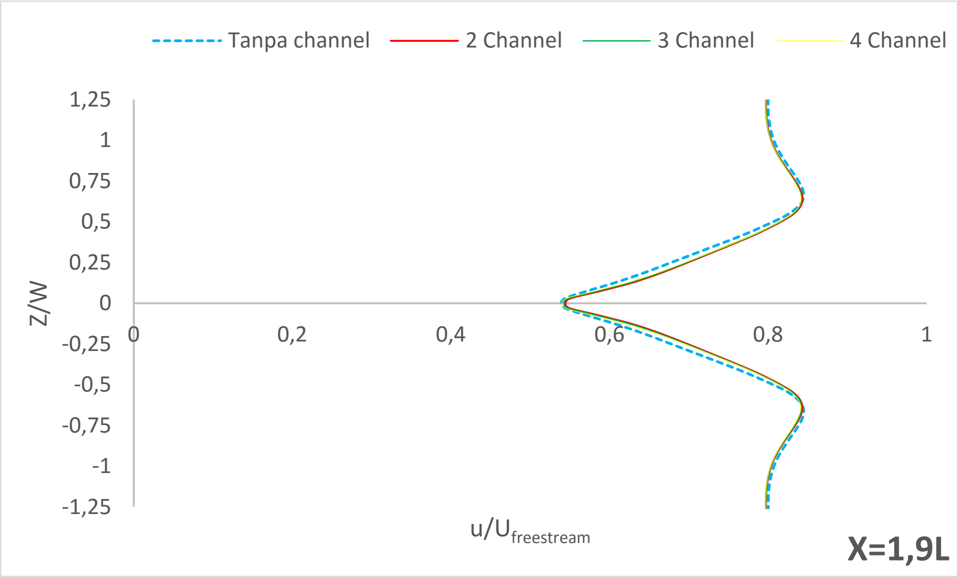
Gambar 4.38. *Velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/Gc = 0,5 di dalam daerah *wake.* (x = 1,3L)



Gambar 4.39. *Velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/Gc = 0,5 di dalam daerah *wake.* (x = 1,5L)



Gambar 4.40. *Velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/Gc = 0,5 di dalam daerah *wake.* (x = 1,7L)



Gambar 4.41. *Velocity profile* pada bidang simetri horizontal Y/Gc = 0,5 di dalam daerah *wake.* (X = 1,9L)

Data pun menunjukan bahwa *channel* mampu meningkatkan kecepatan dan memperbaiki struktur aliran. Perbaikan struktur aliran ini dapat mengurangi tingkat *wake* dibelakang model bus.

4.1.6 Koefisien *Drag* dan *Lift*

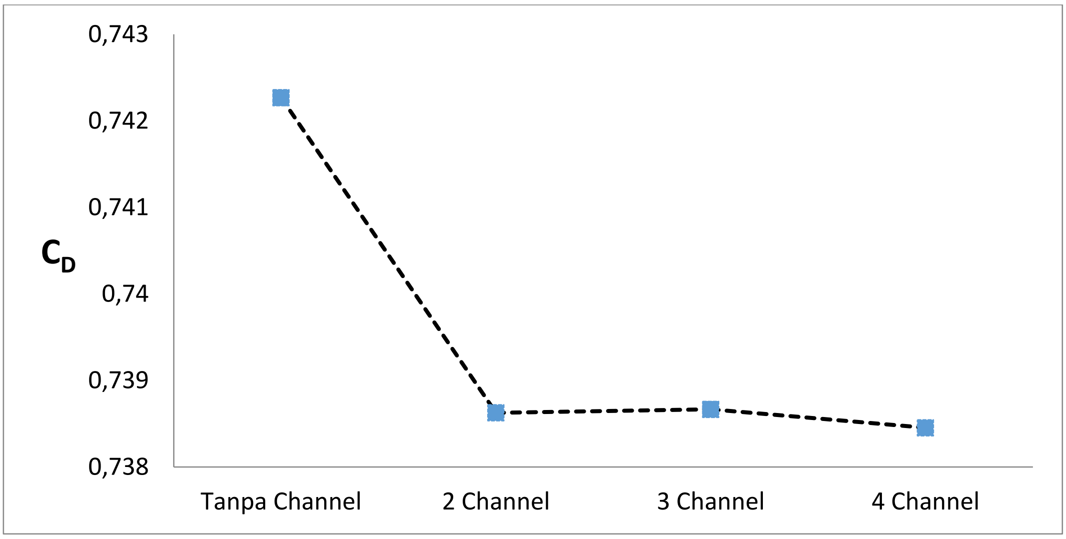
Penelitian terkait aerodinamika kendaraan akan bermuara pada koefisien *drag* dan *lift*. Koefisien *drag* yang rendah menunjukkan bahwa suatu kendaraan dapat melaju lebih leluasa sedangkan *downforce* yang tinggi menunjukkan bahwa kemampuan *handling* suatu kendaraan semakin baik.

Perhitungan koefisien *drag* dan *lift* menggunakan persamaan 2.2 dan 2.3. dengan variable tetap, sebagai berikut ;

- A = 6,059 m^2
- $U_{freestream}$ = 25m/s
- ρ_{udara} = 1.225 kg/m^3

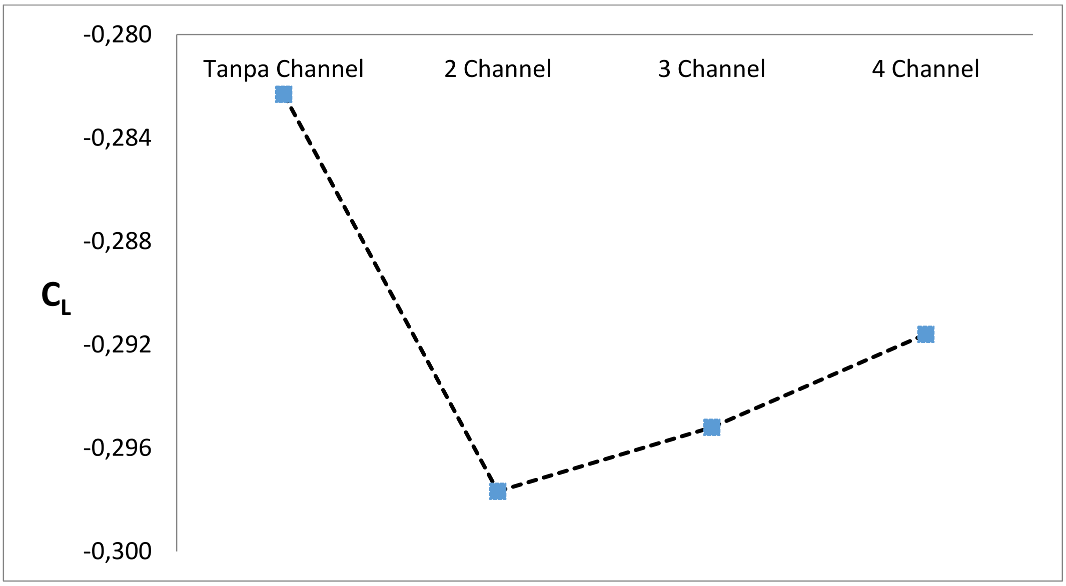
Tabel 4.1. Data perbandingan gaya dan koefisien *drag* serta *lift*

	Koefisien *Drag*	Koefisien *Lift*
Tanpa *Channel*	0,7422	-0,282
2 *Channel*	0,7386	-0,297
3 *Channel*	0,7386	-0,295
4 *Channel*	0,7384	-0,291



Gambar 4.42. Grafik koefisien *Drag*

Gambar 4.42 hasil studi numerik berupa koefisien *drag*. *Multiple-channel diffuser* mampu berkontribusi dalam penurunan nilai koefisien *drag*. *Diffuser* tanpa *channel* tercatat memiliki nilai koefisien *drag* 0,7422, sedangkan *channel* 2,3 dan 4 adalah 0,7386; 0,7386; 0,7384 secara berturut-turut. Penurunan terbesar terjadi pada *diffuser* dengan 4 *channel* dengan persentase penurunan 0,51% terhadap *diffuser* tanpa *channel*.



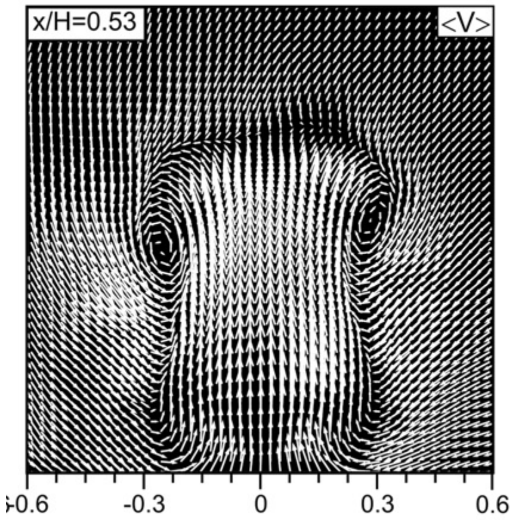
Gambar 4.43. Grafik koefisien *Lift*

Sedangkan gambar 4.43 memberikan informasi terkait koefisien *lift* negatif (*downforce*). Mula-mula koefisien *lift* tanpa *channel* tercatat -0,282 selanjutya

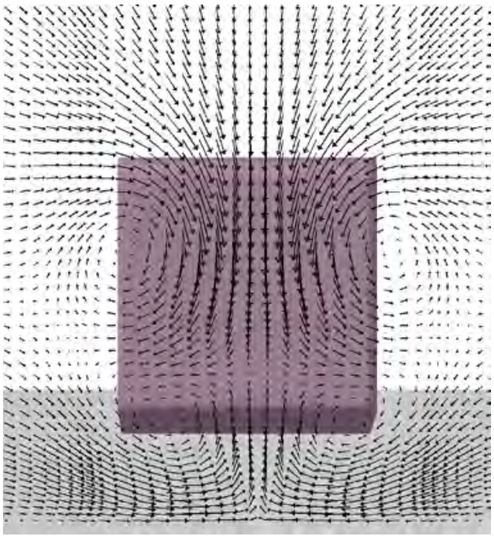
dengan penambahan *multiple-channel* koefisien *lift* menjadi -0,297. *Channel* 3 dan 4 pun mampu meningkatkan *downforce* dihitung relatif terhadap *diffuser* tanpa *channel*. Namun jika membandingkan antara *channel* 2,3 dan 4, koefisien *lift* negatif terbaik dimiliki oleh *channel* 2. Persentase peningkatan *downforce* relative terhadap *diffuser* tanpa *channel* yaitu 5,44%; 4,56%; 3,29% untuk *channel* 2, 3 dan 4.

4.2 Diskusi

Beberapa penelitian terdahulu terkait aerodinamika pada suatu *bluff body* dapat memberikan informasi yang dapat dijadikan perbandingan. Penelitian Gurlek, dkk [14] menyatakan bahwa aliran pada *downstream* suatu model didominasi oleh pasangan *counter rotating vortices.*



(a) Gurlek, dkk [14]

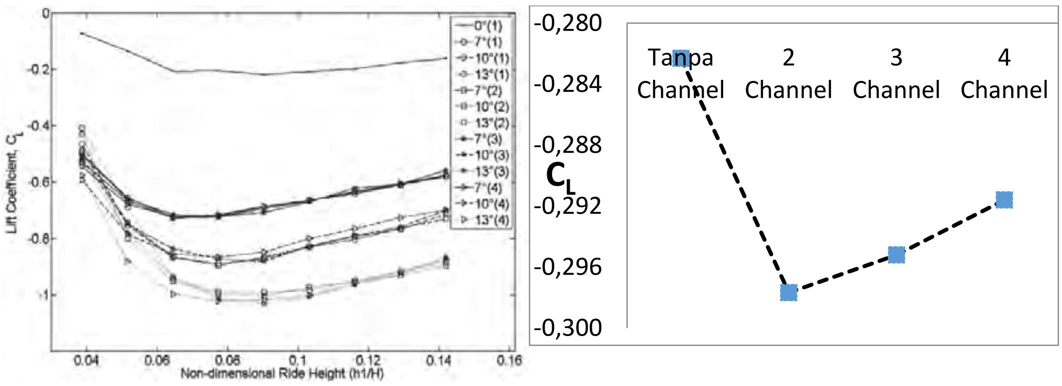


(b) Hasil simulasi

Gambar 4.44. Perbandingan vektor kecepatan pada bidang di belakang model bus

Gambar 4.44 menunjukkan tren hasil yang cukup sama. *Vortices* muncul pada sudut-sudut atas dan bawah kendaraan. Intensitas *vortices* yang berasal dari sudut atas model bus jauh lebih kuat dibandingkan dengan bagian bawah.

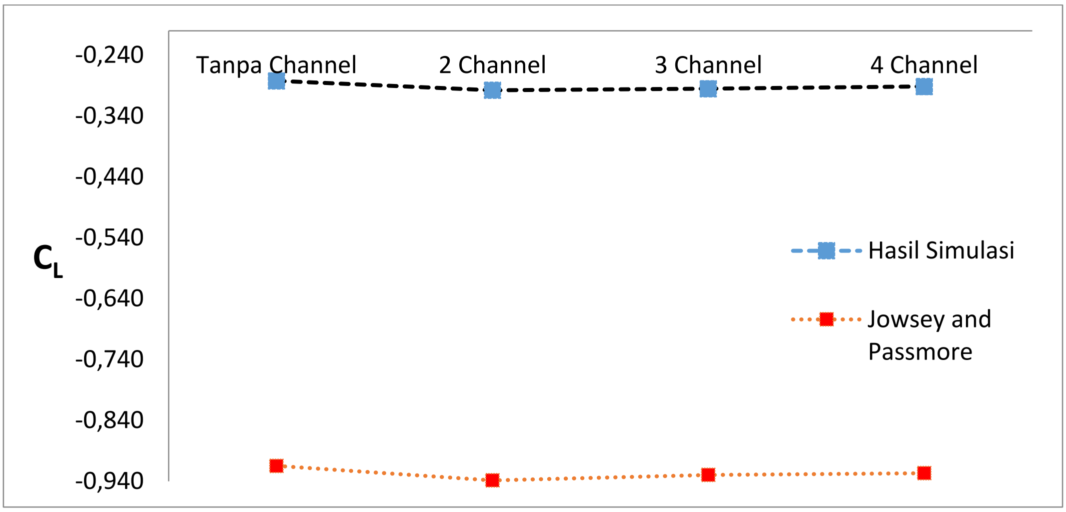
Sedangkan berdasarkan penelitian Jowsey dan Passmore [7] pada sudut *diffuser* 13^o ke atas, konfigurasi *multiple-channel diffusers mampu menigkatkan downforce.* Data hasil dapat diamati pada Gambar 2.8.



(a) Jowsey dan Passmore [7] (b) Hasil simulasi

Gambar 4.45. Grafik perbandingan koefisien *Lift*

Gambar 4.45 menunjukkan bahwa terdapat kesamaan tren hasil pada eksperimen yang dilakukan oleh Jowsey dan Passmore [7] dengan penulis. Koefisien *lift* turun akibat pengaruh dari *multiple-channel diffusers.* Perbedaan yang muncul adalah reduksi *lift* maksimal yang penulis dapatkan terjadi pada 2 *channel* sedangkan Jowsey dan Passmore [7] 3 *channel*.



Gambar 4.46. Plotting koefisien *Lift* Hasil simulasi dan penelitian Jowsey & Passmore [7]

Gambar 4.46 menunjukkan pengaruh *multiple-channel diffuser* pada hasil simulasi dan penelitian Jowsey & Passmore [7]. Hasil menunjukkan kemiripan tren, dimana 2-*Channel* memberikan peningkatan *downforce* terbaik, relatif terhadap tanpa channel.

Tabel 4.2 memberikan informasi tambahan terkait besar persentase kenaikan *downforce* akibat pengaruh *multiple-channel diffuser*. Data yang

digunakan pada penelitian Jowsey & Passmore [7] adalah sudut diffuser 13^o karena dianggap mendekati hasil simulasi penulis. Peningkatan *downforce* terbesar yaitu 5,44% pada hasil simulasi saat ini dan 2,60% pada penelitian Jowsey & Passmore [7] untuk 2 *channel*.

Tabel 4.2. Perbandingan koefisien *lift* hasil simulasi dengan Jowsey & Passmore [7]

	Koefisien Lift			
	Hasil Simulasi	% peningkatan	Jowsey & Passmore	% peningkatan
Tanpa *Channel*	-0,282	-	-0,915	-
2 *Channel*	-0,297	5,44	-0,938	2,60
3 *Channel*	-0,295	4,56	-0,929	1,62
4 *Channel*	-0,291	3,28	-0,926	1,30

Tabel 4.3. Perbandingan *pressure force* dan *viscous force* dalam *drag.*

	Pressure Force (N)	*Viscous Force* (N)	*Pressure Force/ Viscous Force*	Koefisien *Drag*
Tanpa *Channel*	*1542,60*	*179,85*	8,57	0,7422
2 *Channel*	*1535,27*	*178,73*	*8,58*	0,7386
3 *Channel*	*1535,39*	*178,70*	*8,59*	0,7386
4 *Channel*	*1534,98*	*178,62*	*8,59*	0,7384

Tabel 4.3 menjelaskan tentang pengaruh *pressure force* dan *viscous force* terhadap *drag* yang dihasilkan. Tabel 4.3 mengungkapkan bahwa *drag* pada penelitian ini merupakan dominan akibat dari *pressure.* Hanya sekitar 1:8 *drag* dikontribusi oleh *friction drag.*

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisa data studi numerik pengaruh *multiple-channel diffusers* pada bodi belakang bus, maka dapat disimpulkan

1. *Multiple-channel diffusers* dapat meningkatkan kecepatan pada bagian bawah serta memperbaiki struktur aliran pada bagian belakang model bus. Perbaikan struktur aliran ini dapat mengurangi tingkat *wake* dibelakang model bus.
2. *Multiple-channel* dengan variasi jumlah *channel* 2,3 dan 4 menunjukkan fenomena serta tren hasil yang cenderung sama.
3. Penurunan koefisien *drag* tertinggi didapatkan pada jumlah *channel 4.* Dibandingkan dengan tanpa *channel,* 4 *channel* dapat menurunkan koefisien *drag* hingga 0,51%.
4. Peningkatan koefisien *negative lift* (*downforce)* tertinggi didapatkan pada jumlah *channel 2.* Dibandingkan dengan tanpa *channel,* 2 *channel* dapat meningkatkan *negative lift* hingga 5,44%.

5.2 Saran

Setelah melakukan penelitian ini, maka peneliti menyarankan pada peneliti berikutnya :

1. Untuk mengoptimalkan efek dari *multiple-channel diffusers,* disarankan untuk mendesain *multiple-channel diffusers* yang lebih riil layaknya pada kendaraan terkini atau bahkan *supercars.*
2. Untuk melihat pengaruh yang lebih riil, disarankan untuk memvariasikan dengan berbagai macam ketinggian *ground clearance.* Agar mendapatkan gambar tentang berbagai macam kendaraan yang notabene memiliki variasi *ground clearance.*
3. Untuk melihat pengaruh yang lebih riil, disarankan untuk memasukkan faktor ban dan *moving wall* pada *ground.*

4. Faktor-faktor lain yang harus diperhatikan dalam studi numerik adalah berupa teknik *meshing* demi mendapatkan hasil yang *valid* serta waktu perhitungan yang efisien.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Statistics Indonesia, Land Transportation Statistics (2014).

[2] Ministry of Transportation, Beberapa Kebijakan Sektor Transportasi Darat Dalam Upaya Penghematan Penggunaan Bahan Bakar Minyak (BBM) (2005).

[3] Silitonga A.S, Atabania A.E, and Mahlia, T.M.I., Review on fuel economy standard and label for vehicle in selected ASEAN countries, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 1683– 1695 (2012).

[4] Widodo, W.A, dan Karohmah, M. N., (2015), "*CFD based investigations into optimization of diffuser angle on rear bus body", International Conference on Mechanical Engineering, (accepted)*

[5] Hu Xingjun, Zhanga Rui, Yeb Jian, Yanb Xu dan Zhaob Zhiming, (2011), "Influence of Different Diffuser Angle on Sedan's Aerodynamic Characteristics", *International Conference on Physics Science and Technology*, hal. 239-245.

[6] Hassan Rakibul, Islam Toukir, Ali Mohammad dan Islam Quamrul, (2013), "*Numerical Study on Aerodynamic Drag Reduction of Racing Cars", 10th International Conference on Mechanical Engineering*, hal. 308-313.

[7] Jowsey, L., and Passmore, M.A., *"Experimental Study of Multiple-Channel Automotive Underbody Diffusers"*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 224(7), (2010) 865-879.

[8] Lai, C., Kohama, Y., Obayashi, S., Jeong, S., *"Experimental and Numerical Investigation on the Influence of Vehicle Rear Diffuser Angle on Aerodynamic Drag and Wake Structure*", International Journal of Automotive Engineering, 2 (2011) 47–53.

[9] Kang, S. O., Jun, S. O., Park, H. I., Song, K. S., Kee, J. D., Kim, K. H. dan Lee, D.H., (2012), *"Actively Translating A Rear Diffuser Device for the*

Aerodynamic Drag Reduction of a Passenger Car", *International Journal of Automotive Technology,* Vol. 13, No. 4, hal. 583−592.

[10] Hucho, W., (1997), *Aerodynamics of Road Vehicles*, Butterworth-Heinemann, London.

[11] Blevins, R, D., (1984), *Applied Fluid Dynamics Handbook,* Van Nostrand Reinhold, New York.

[12] Andersson, B., Andersson, R., Hakansson, L., Mortensen, M., Sudiyo, R., van Wachem, B., (2012), *Computational Fluid Dynamics for Engineers,* Cambridge University Press, United Kingdom.

[13] Pritchard, P. J., (2011), Fox and Mcdonald's Introduction to Fluid Mechanics, John Wiley & Sons, Inc., United States of America.

[14] Gurlek, C., Sahin, B., Ozkan, S.M., *"PIV studies around a bus model*", Experimental Thermal and Fluid Science 38 (2012) 115-126.

[15] Bearman, P.W., *"Near Wake Flows Behind Two-Dimensional and Three-Dimensional Bluff Bodies*", J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 69-71 (1997) 33-54.

BIODATA PENULIS

Penulis dilahirkan di Jakarta pada tanggal 3 Juni 1991. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Suhermanto dan Ibu Sukamti. Penulis menempuh pendidikan dasar di MI Al-istiqomah Tangerang, lulus pada tahun 2003. Pendidikan Menengah Pertama di tempuh di SMP negeri 9 Tangerang, lulus pada tahun 2006. Pendidikan menengah atas di tempuh di SMA negeri 8 Tangerang, lulus pada tahun 2009. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan Strata 1 di Perguruan Tinggi Negeri tepatnya di Jurusan Teknik Mesin Universitas Sebelas Maret Surakarta (UNS-Solo) melalui jalur SNMPTN (Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri) dan lulus pada Mei 2014. Pada tahun 2014, penulis melanjutkan studinya di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Jurusan Teknik Mesin pada program studi rekayasa konversi energi melalui jalur mandiri.